

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE ARQUITECTURA URBANISMO Y GEOGRAFÍA.
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFÍA.



**REMOCIONES EN MASA DESENCADENADAS POR LLUVIAS EN
LA CORDILLERA DE LOS ANDES: INVENTARIO 2023-2024 PARA
LA REGIÓN DEL BIOBÍO, CHILE**

TRABAJO FINAL MAGÍSTER EN ANÁLISIS GEOGRÁFICO

Luis Alberto Gajardo Pino
Dra. Edilia Del Carmen Jaque Castillo
Dr. Mario Fernando Lillo Saavedra

Ciudad Universitaria, Concepción, abril 2025

A mis seres queridos

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Dra. Edilia Jaque Castillo, al Dr. Mario Lillo Saavedra y al Dr. (c) Francisco Castro Venegas por su apoyo académico, sus valiosos comentarios y por la confianza depositada en mi trabajo; a todo el grupo de estudio Multiamenazas Biobío por su colaboración técnica en el trabajo de campo y sus observaciones, en especial a Felipe Baltierra Suazo, Miguel Salas Oyarzo y Joaquín Espinoza Sandoval. También extendiendo mi gratitud a la Dra. María José Herrera Ossandón y al PhD Alfonso Fernández Rivera por sus comentarios y las referencias bibliográficas compartidas. A mis seres queridos, familia y amistades, gracias por sus ánimos, sugerencias y conversaciones enriquecedoras.

Quiero agradecer al proyecto **FONDEF D22I0334**, *Implementación de una infraestructura de datos geoespacial geomorfológica (I2GEO) para la región del Biobío: Una herramienta estandarizada para la planificación territorial*, por facilitar la licencia de ArcGIS PRO para la realización de los análisis espaciales y la cartografía de este trabajo, así como por el financiamiento del trabajo en terreno. Asimismo, agradezco al proyecto **Anillo ACT-210080**, *Cold-Blooded: Drivers of Climate Change Refugia for Glacier and Streamflow Responses*, por el préstamo del dron empleado en la documentación fotográfica de remociones en masa.

RESUMEN

Las remociones en masa (RM) son procesos geodinámicos que alteran el paisaje y generan pérdidas materiales y humanas a nivel global. Son causadas principalmente por precipitaciones intensas, sismos y acción antrópica. En regiones montañosas, las RM son indicadores clave de cambio climático y pueden formar represas naturales que ocasionan inundaciones catastróficas. Para abordar el análisis de estos fenómenos, en algunas regiones del mundo se han desarrollado inventarios que registran su distribución y características, esenciales para elaborar mapas de susceptibilidad, peligro y riesgo. Sin embargo, en Chile y específicamente en la Cordillera de los Andes, la falta de inventarios detallados limita el conocimiento de estos procesos. En regiones con inventarios exhaustivos, se ha identificado el fenómeno de "dependencia de la trayectoria", que describe cómo las zonas afectadas por remociones en masa (RM) se vuelven más inestables durante un periodo específico, lo que tiene implicancias en la modelación de la susceptibilidad. No obstante, la elaboración de inventarios enfrenta importantes desafíos, especialmente en regiones montañosas donde las condiciones nubosas dificultan la observación satelital tras lluvias intensas. Frente a este problema, los sensores de Radar de Apertura Sintética (SAR) son eficaces al operar independientemente de la nubosidad y luz solar. Google Earth Engine (GEE) permite procesar datos Sentinel-1 (S1) para detectar RM de forma rápida y precisa. Los trabajos existentes que emplean este enfoque para detectar RM generalmente contrastan los resultados con inventarios previamente elaborados. Sin embargo, esto no es viable en la Cordillera de los Andes, donde los inventarios son inexistentes o los registros de las fechas carecen de precisión, lo que representa una brecha importante en el conocimiento y manejo de estos procesos. Este trabajo aborda esta brecha mediante la elaboración de un inventario de RM inducidas por lluvias intensas en la Cordillera de los Andes, Región del Biobío, Chile, para los años 2023 y 2024. Este enfoque deduce la ocurrencia de RM a partir de eventos de lluvias intensas, utiliza herramientas avanzadas como Google Earth Engine (GEE) para generar mapas de cambios en la retrodispersión SAR Sentinel-1 (S1), complementados con digitalización en ArcGIS Pro y validación en terreno. Como resultado de este estudio, se cartografiaron 55 RM, donde predominan flujos y avalanchas de escombros; estas RM se identificaron solo para el año 2023, en 2024 no se identificaron RM, lo que impidió confirmar la existencia de dependencias de trayectoria, aunque los datos sugieren una conexión con patrones climáticos como la fase cálida del ENSO (El Niño) y los ríos atmosféricos. En síntesis, los resultados de este estudio proporcionan un inventario detallado que no solo contribuye al análisis de distribución de las RM, sino que también abre líneas futuras de investigación, como la mejora de técnicas de detección mediante SAR, el análisis de umbrales de precipitación y la capacidad predictiva de modelos de susceptibilidad. Se concluye que, para observar la dependencia de trayectoria, será necesario abarcar un período de al menos 10 años en el monitoreo. Asimismo, en un contexto de cambio climático, donde se proyecta un aumento en la frecuencia de eventos extremos como lluvias intensas, RM e inundaciones, la actualización continua de este inventario será crucial para la elaboración de mapas de susceptibilidad, peligro y riesgo, herramientas indispensables para la planificación y gestión territorial en el ámbito del riesgo.

Palabras clave: Inventario de remociones en masa; Dependencia de la trayectoria; Radar de apertura sintética; Cordillera de los Andes, Región del Biobío.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Motivación y relevancia.....	1
1.2. Planteamiento del problema.....	2
1.3. Hipótesis.....	3
1.4. Objetivos	3
1.4.1. Objetivo general	3
1.4.2. Objetivos específicos.....	3
1.5. Metodología	4
1.5.1. Área de estudio	5
1.5.2. Caracterización de remociones en masa inducidas por lluvias e identificación de dependencia de la trayectoria.....	9
2. MARCO DE REFERENCIA	16
2.1. Definiciones relevantes: Remociones en masa	16
2.2. Estudios de referencia	19
2.2.1. Detección de remociones en masa midiendo cambios de intensidad de retrodispersión con SAR S1 en GEE.....	19
2.2.2. Remociones en masa dependientes de la trayectoria	20
3. RESULTADOS	21
3.1. Detección de remociones en masa	21
3.1.1. Eventos de lluvias intensas (2023-2024)	21
3.1.2. Remociones en masa identificadas mediante datos SAR S1 en GEE.....	23
3.2. Inventario de remociones en masa	25
3.2.1. Tipos y cantidad de remociones en masa cartografiadas	25
3.2.2. Validación en terreno	26
3.3. Análisis de datos.....	28
3.3.1. Área afectada por remociones en masa y elevación máxima	28
3.3.2. Distribución de áreas afectadas por remociones en masa de acuerdo con grillas del IGM	31
4. DISCUSIÓN.....	35
4.1. Identificación de remociones en masa mediante SAR S1 en GEE	35
4.2. Tipologías y características de remociones en masa identificadas	38

4.3. Distribución de áreas afectadas por remociones en masa de acuerdo con la grilla del IGM	40
4.4. Remociones en masa dependientes de la trayectoria	40
4.5. Características y calidad del inventario elaborado.....	40
4.5.1. Validación en terreno del inventario	41
4.6. Desafíos futuros respecto del enfoque utilizado y el área de estudio	42
5. CONCLUSIÓN	44
6. BIBLIOGRAFÍA.....	46
7. ANEXO	53
Anexo 1: Tabla de resultados.....	53
Anexo 2: Inventario geomorfológico de remociones en masa.....	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Códigos del mapa geológico del área de estudio.....	8
Tabla 2. Clasificación de Varnes de tipos de remociones en masa actualizada	18
Tabla 3. Eventos de lluvias intensas identificados entre 2023 y 2024 en la estación María Dolores	22
Tabla 4. Períodos de eventos de interés para el código GEE y detección de remociones en masa ..	23
Tabla 5. Cantidad de imágenes SAR apiladas para la detección de remociones en masa en cada evento.....	25

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología	4
Figura 2. Cordillera de los Andes, Región del Biobío, Chile: Localización y geología	5
Figura 3. Elevación y subdivisión por grilla de la superficie del área de estudio	6
Figura 4. Mantos de derrubios en laderas de la cabecera del estero Pirquinco	9
Figura 5. Diagrama de flujo de detección de remociones en masa en GEE con SAR S1	13
Figura 6. Comparación entre eventos de lluvias intensas identificados entre 2023 y 2024 en la estación María Dolores	22
Figura 7. Distribución de tipos de remociones en masa del inventario elaborado	26
Figura 8. Fotografías de remociones en masa inventariadas que se validaron en terreno en octubre	27
Figura 9. Contexto geomorfológico de una remoción en masa validada en terreno: Taludes de depósitos mal seleccionados en la ruta Q-689	28
Figura 10. Área de afectación de las remociones en masa inventariadas.....	29
Figura 11. Distribución de elevación máxima según tipos de remociones en masa del inventario..	30
Figura 12. Superposición de la grilla del IGM sobre el mapa de calor del inventario de remociones en masa	32
Figura 13. Distribución de remociones en masa según la grilla IGM en el área de estudio.....	33
Figura 14. Detección de remociones en masa mediante cambios de retrodispersión SAR S1 en un valle perpendicular al río Cholguán (Zona G009).....	35
Figura 15. Avalanchas de escombros ocurridas en el evento 1 en la zona G032 inventariadas	39

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación y relevancia

Recientemente, Thornton et al. (2021) han definido los mapas de peligros naturales como variables climáticas esenciales en ambientes montañosos (EMCV, por sus siglas en inglés), debido a que no estaban estipulados dentro de las variables climáticas esenciales (ECV, por sus siglas en inglés) definidas por el Sistema Mundial de Observación del Clima (GCOS, por sus siglas en inglés), a pesar de que entre sus objetivos fundamentales se encuentran la mitigación y la evaluación del riesgo.

En este sentido los inventarios de remociones en masa (RM) son un insumo fundamental para evaluar peligros naturales y aportar a la gestión del riesgo (Guzzetti et al., 2012). Sin embargo, los datos de RM en la Cordillera de los Andes de Chile, son escasos en comparación con la disponibilidad de datos de inventarios para otras regiones montañosas del mundo como Europa y Asia (Morales et al., 2022). En Chile, el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) lleva un registro de RM para todo el territorio nacional (SERNAGEOMIN, 2024) centrados preferentemente en datos de RM en la zona andina de la región Metropolitana y la Patagonia; los que resultan ser insuficientes para el desarrollo de enfoques más avanzados en la identificación de RM y la modelación de la susceptibilidad; Machine Learning y Deep Learning (Maragaño-Carmona et al., 2023; Morales et al., 2022). Esto ha motivado esfuerzos en la elaboración de un inventario de RM en la Patagonia (Morales et al., 2022). Sin embargo, el registro de las fechas de ocurrencia de RM carece de precisión, debido a limitaciones técnicas en el enfoque basado en imágenes ópticas, por lo mismo se ha manifestado la necesidad de avanzar en la detección de RM mediante Radar de Apertura Sintética (SAR) (Morales et al., 2022).

Las RM en regiones montañosas pueden causar inundaciones catastróficas debido a la formación de represas (Evans et al., 2011). En 1960, en la región de Los Lagos, RM desencadenadas por un terremoto de magnitud 9.5, bloquearon el desagüe natural del lago Riñihue por el río San Pedro, generando una inundación que pudo ser catastrófica, de no ser por el control del desborde de las aguas represadas (FCFM, 2023; Haefele et al., 2003). En la región del Biobío, Abele (1984) y Romero et al. (2022), han estudiado la gran represa por un deslizamiento traslacional inducido por una erupción volcánica (7.100 años AP) a los pies del volcán Antuco y la evidencia de depósitos aluviales de alta energía posteriores (~ 3.400 - 1.700 años AP) por rupturas de presa al menos ~ 200 km río abajo, resaltando la necesidad de ahondar en el estudio de estos procesos en el área.

Este trabajo busca ser un estudio precursor en la investigación de la distribución y características de las remociones en masa (RM) inducidas por lluvias en la Cordillera de los Andes, de la Región del Biobío, Chile, mediante la elaboración de un inventario de RM ocurridas en los inviernos de 2023 y 2024 por eventos de lluvias intensas, a partir de un enfoque basado en SAR, con lo cual se espera encontrar relaciones de dependencia entre RM pasadas y posteriores, que permitan estudiar la evolución de estos procesos en el área, lo cual es relevante para la gestión del riesgo y la planificación territorial en el contexto de calentamiento global, ya que se prevé que estos eventos serán más frecuentes (IPCC, 2023).

1.2. Planteamiento del problema

Un inventario de RM es fundamental para conocer la distribución y características de estos procesos y permiten estudiar su evolución y la elaboración de mapas de susceptibilidad, peligro y riesgo por RM, que son herramientas de apoyo en la gestión del riesgo (Guzzetti et al., 2012). Sin embargo, Los registros de remociones en masa (RM) inducidas por lluvias en la región del Biobío se han centrado únicamente en el área costera (por ejemplo: Fustos et al., 2017; Fustos et al., 2020; López et al., 2015; López et al., 2021; Mardones & Brito, 1978; Mardones et al., 2004; SERNAGEOMIN, 2024), por lo que sus características y distribución en la Cordillera de los Andes es desconocida.

Las RM del pasado pueden afectar las RM del futuro, ya que cambian la morfología de la superficie, las propiedades del sedimento o regolito, la vegetación y el ángulo de la pendiente (Samia et al., 2017). Las RM que ocurren en el escarpe de RM anteriores se denominan RM dependientes de la trayectoria (Temme et al., 2020). La identificación de RM dependientes de la trayectoria tiene incidencia en el análisis de la susceptibilidad que, es la base para la elaboración de mapas de peligro y riesgo, ya que indican un aumento de la probabilidad de ocurrencia de RM en el área afectada durante cierto período (Samia et al., 2017, 2020).

En el contexto de cambio climático se prevé que los eventos de lluvias intensas serán más prolongados con lo que el riesgo de inundación y RM serán mayores (IPCC, 2023; Muller, 2022; Pei et al., 2023; Ralph et al., 2020; Zscheischler et al., 2020). En los Andes occidentales, entre los 30 y 38° de latitud sur, se estima que las precipitaciones en la estación húmeda en condiciones cálidas serán más frecuentes, lo que implica una mayor recurrencia de RM e inundaciones en el futuro (Mardones & Garreaud, 2020). Por tanto, la elaboración de un inventario de RM que sirva para el estudio de la evolución de RM inducidas por lluvias en la Cordillera de los Andes, región del Biobío, resulta pertinente y necesario.

Si bien, existen diversos enfoques para la cartografía de RM, todos presentan limitaciones que influyen en la calidad del inventario (Guzzetti et al., 2012). La teledetección proporciona un mayor alcance visual de las RM cuando son demasiado grandes para ser apreciadas en terreno (Guzzetti et al., 2012), además, permite cubrir RM en áreas montañosas remotas (Abad et al., 2022). Las técnicas de Radar de Apertura Sintética (SAR), en comparación con las imágenes satelitales ópticas, disponen de imágenes independientemente de las condiciones meteorológicas y la iluminación solar (Jung & Yung, 2020) y, además, datos globales de forma regular (Handwerger et al., 2020, 2022).

Recientemente, Handwerger et al. (2020, 2022) han desarrollado un enfoque para la detección de RM, midiendo cambios de intensidad de retrodispersión con SAR, mediante el apilamiento de datos multitemporales Sentinel-1 (S1) en Google Earth Engine (GEE). La aplicación de este enfoque basado en la nube no requiere descargar, almacenar y gestionar grandes volúmenes de datos y la utilización de un software SAR especializado. Sin embargo, la precisión de la detección de RM depende de la cantidad de datos apilados posterior al evento, el tamaño de las RM y se recomienda que en regiones que tienen cambios estacionales significativos, los datos previos y posteriores al evento sean de la misma temporada.

Luego de más de una década con déficit de precipitaciones en Chile (Garreaud, 2023b), en el invierno del 2023 y 2024, eventos de lluvias intensas desencadenaron inundaciones y RM que afectaron a la

población desde Valparaíso hasta el Biobío (Agouborde & Dote, 2023; Garreaud, 2023a, 2024). Dado que los eventos son recientes y se dispone de datos S1 en GEE desde octubre de 2014 hasta la fecha, la elaboración de un inventario para los períodos aludidos es factible.

En base al problema planteado se han formulado las preguntas de investigación siguientes:

1. ¿A partir de la medición de cambios de retrodispersión en GEE es posible construir un inventario de RM inducidas por lluvias y conocer su distribución y características en la Cordillera de los Andes, región del Biobío, en los eventos meteorológicos extremos ocurridos en los inviernos de 2023 y 2024?
2. ¿Esta caracterización permitirá identificar RM dependientes de la trayectoria en el 2024?

1.3. Hipótesis

Una cartografía geomorfológica de RM inducidas por lluvias en los inviernos de 2023 y 2024, y generada a partir de datos obtenidos del sensor Sentinel-1, en la Cordillera de los Andes, Región del Biobío, permitirá la identificación RM dependientes de la trayectoria en el 2024.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Diseñar, implementar y validar una metodología que permita caracterizar RM inducidas por lluvias e identificar las que son dependientes de la trayectoria para los eventos de lluvias intensas ocurridos en los inviernos de 2023 y 2024 en la zona andina de la Región del Biobío.

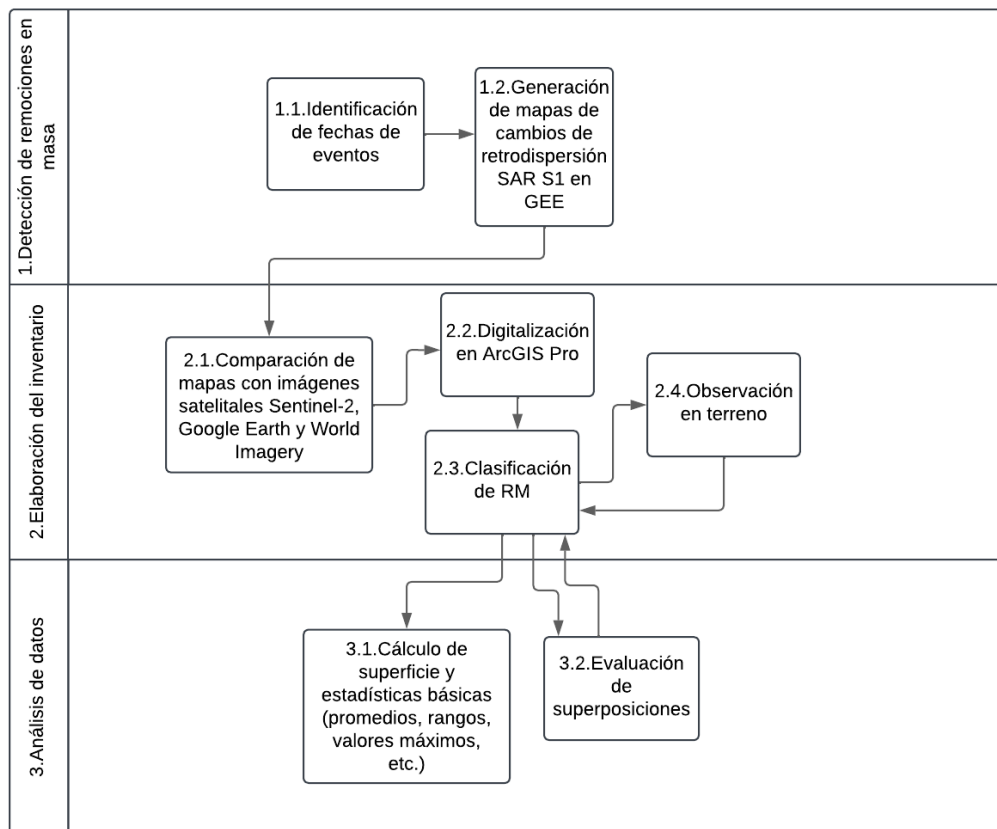
1.4.2. Objetivos específicos

1. Detectar remociones en masa (RM) mediante técnicas de sensoramiento remoto.
2. Elaborar un inventario geomorfológico de RM de eventos
3. Analizar de manera cuantitativa y cualitativa los datos de RM

1.5. Metodología

El enfoque metodológico utilizado para la caracterizar RM e identificar dependencia de la trayectoria se divide en tres procesos principales, 1. Detección de RM, 2. Elaboración del inventario y 3. Análisis de datos (Figura 1). A su vez, cada uno de estos procesos se divide en los subprocesos siguientes, 1.1. Identificación de fechas de eventos, 1.2. Generación de mapas de cambios de retrodispersión SAR S1 en GEE, 2.1. Comparación de mapas con imágenes satelitales Sentinel-2, Google Earth y World Imagery, 2.2. Digitalización, 2.3. Clasificación de RM, 2.4. Observación en terreno, 3.1. Cálculo de superficie y estadísticas básicas y 3.2. Evaluación de superposiciones.

Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología



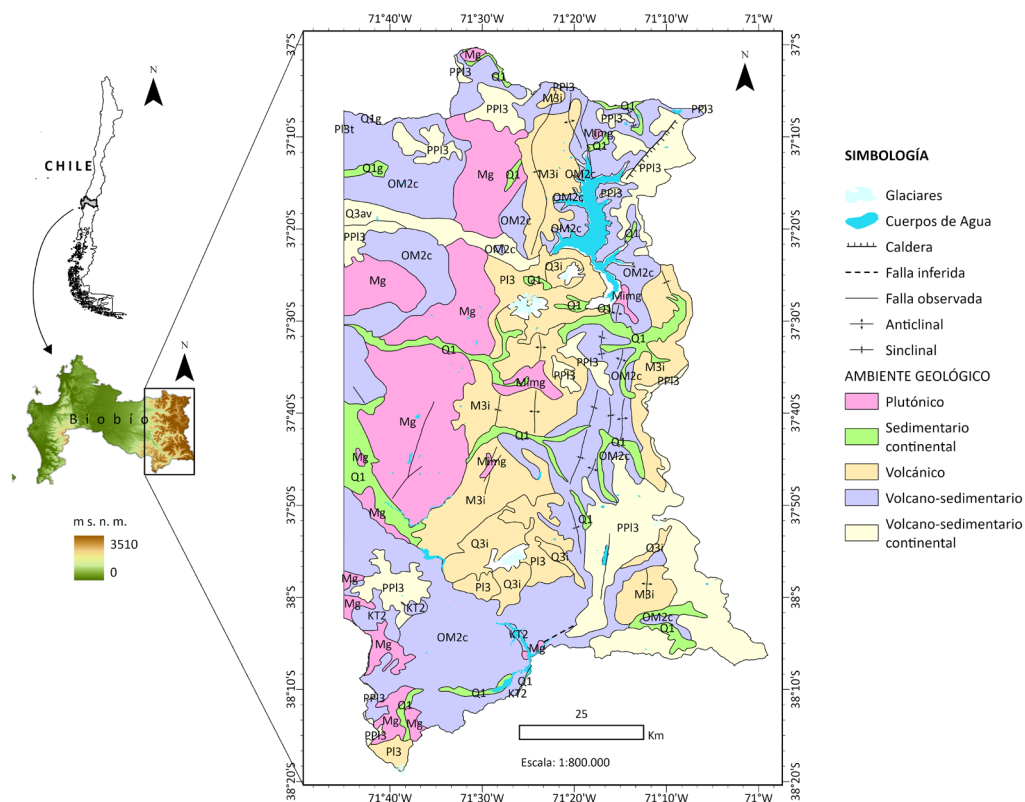
El subproceso 2.3 recibe flujos de retroalimentación, tanto de 2.4 y 3.2, ya que son subprocesos que reajustan la clasificación. Elaboración propia

1.5.1. Área de estudio

El área de estudio comprende todo el sistema montañoso de la Cordillera de los Andes, región del Biobío, Chile. Entre los 36° 59' y 38° 19' latitud sur, y los 70° 58' y 71° 45' longitud oeste. Se ubica en el extremo oriental de la región del Biobío (Figura 2), tiene una superficie de 6.387 km², equivalente a una cuarta parte de la cuenca del río Biobío. De acuerdo con el censo de 2017, alberga al 0,3% de la población regional; 4.023 habitantes.

Las superficies entre alturas de 1.000 y 2.000 m s. n. m. equivalen a un 73 % del área, seguido de las superficies entre 300 y 1.000 m s. n. m. con un 19 %. El 7 % de esta está entre los 2.000 y 2.500 m s. n. m., un 0,6 % entre los 2.500 y 3.000 m s. n. m. y un 0,1 % entre los 3.000 y 3.524 m s. n. m. Resaltan de norte a sur, cubiertas por glaciares, las cumbres del volcán Antuco, 2.979 m s. n. m.; Sierra Velluda, 3.585 m s. n. m.; volcán Copahue, 3.001 m s. n. m., y el Volcán Callaqui, 3.164 m s. n. m. (Figura 3).

Figura 2. Cordillera de los Andes, Región del Biobío, Chile: Localización y geología

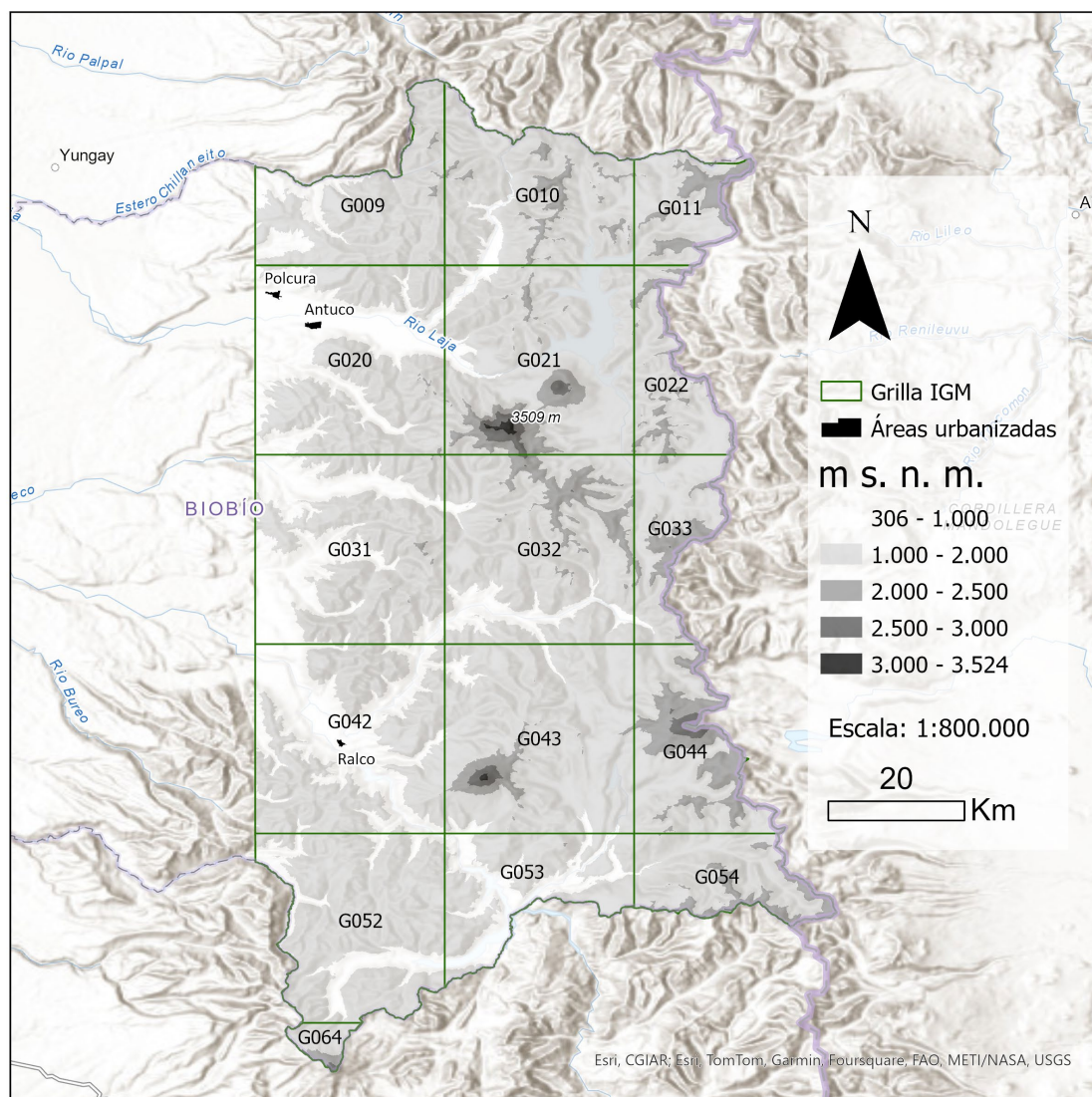


Fuente: BCN (2024), DGA (2022) y SERNAGEOMIN (2003). Elaboración propia

Las litologías de origen volcánico son predominantes, principalmente lavas basálticas a dacitas, rocas epiclásticas y piroclásticas (OM2c) y lavas, brechas, domos y rocas piroclásticas andesítico-basálticas a dacíticas (M3i) (Tabla 1). Serey et al. (2019) en un estudio sobre RM desencadenadas por el

terremoto de 2010 en Chile, entre las latitudes 32,5° S y 38,5° S, han observado el predominio de estos procesos en litologías volcánicas y volcano-sedimentaria cubriendo el 41 % del área afectada por RM.

Figura 3. Elevación y subdivisión por grilla de la superficie del área de estudio



Fuente: Elaboración propia

Otro tipo de litología que predomina en el área son de origen plutónico como las rocas granodioritas, dioritas, tonalitas, monzogranitos, monzodioritas, monzonitas y dioritas de biotita y hornblenda. Esta litología, en la zona costera de la región del Biobío, alteradas por meteorización química, en pendientes superiores a 20°, son favorables a procesos de RM inducidas por precipitaciones, debido a las propiedades plásticas del suelo residual (Mardones & Brito, 1978; Ilabaca, 1980; Mardones & Vidal, 2001; Mardones et al., 2004).

Entre las litologías más recientes destaca un gran depósito de avalancha volcánica (Q3av) (Tabla 1) que represa el cuerpo de agua más grande en el área, la laguna Laja, y rellena el valle que se extiende hacia el oeste, seguido de los depósitos aluviales, coluviales y de RM (Q1) que cubren el resto de los fondos de valle.

La geomorfología del área hace posible una abundante retención de nieve y agua en estado sólido, debido al frío en altura. Además, los valles altos están cubiertos por sedimentos glacio-volcánicos, asociados a episodios de volcanismo en las glaciaciones cuaternarias (Börgel, 1965). Dado este contexto geomorfológico, los depósitos de lahares son comunes en la región, por ejemplo, en el valle Laja (Thiele et al., 1998). Los taludes que forman suelen ser inestables debido a la naturaleza caótica de su composición, caracterizada por clastos angulosos soportados en una matriz fina. Igualmente, el periodo glaciario ha modelado valles con laderas empinadas y la denudación de estas ha producido acumulación de depósitos sueltos inestables (Figura 4) que, debido al posterior retroceso glaciario, la dinámica fluvial ha movilizó a los valles y en laderas abruptas son favorables a procesos de RM (Hauser, 2000).

El clima del centro de Chile (30-38 ° S) está definido por la influencia del Anticiclón del Pacífico Sur y su desplazamiento estacional norte-sur (Barria et al., 2019). Las precipitaciones se concentran entre los meses de mayo y septiembre (Mardones & Garreaud, 2020), y dependiendo de la elevación, la precipitación anual y la temperatura media anual puede variar entre 2.100 y 700 mm y 11 °C a 3 °C, respectivamente (Sarricolea et al., 2017). La región muestra una variabilidad interanual asociada con el Niño Oscilación del Sur (ENOS) y el Modo Anular del Sur (SAM), y fluctuaciones interdecadales, relacionadas con la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) (Barria et al., 2019). Entre 1958 y 2018 se ha observado un ascenso de la Altitud de la Línea de Equilibrio (ELA) de $\sim 114 \pm 21$ m que se atribuye principalmente al cambio climático. La elevación de la isoterma 0 °C, en el invierno austral, entre los 36 y 38° sur, está en ~ 2.000 m s. n. m. en los días húmedos y ~ 2.500 m s. n. m. en los días secos (Mardones & Garreaud, 2020).

La variabilidad climática y el cambio climático tiene influencias en la altitud de la isoterma 0 °C, que es el nivel donde la precipitación cambia de fase líquida a sólida (Vásquez, 2020). En las cuencas de la zona andina, las tormentas bajo condiciones cálidas pueden resultar en un aumento de la cantidad de agua recibida, debido a la lluvia en áreas que normalmente recibe nieve y al derretimiento de nieve por la lluvia sobre nieve (ROS, por sus siglas en inglés). Esto influye en el umbral a partir del cual se generan inundaciones y RM (Pall et al., 2019), un fenómeno que aún no se ha estudiado en la región. Los eventos ROS están asociados a flujos de escombros (Ocampo & Meza, 2020). En el área de estudio los taludes de materiales inestables son comunes y al ser removidos pueden alimentar flujos de escombros y obstruir drenajes, lo que genera inundaciones que representan un riesgo para la población que habita en los valles.

Tabla 1. Códigos del mapa geológico del área de estudio

Código	Edad	Ambiente	Nombre
Q1	Pleistoceno-Holoceno	Sedimentario continental	Depósitos aluviales, coluviales y de remoción en masa
Q1g	Pleistoceno-Holoceno	Sedimentario continental	Depósitos morrénicos, fluvioglaciales y glaciolacustres
Q3av	Cuaternario	Volcanosedimentario continental	Depósitos de avalancha volcánica Cuaternario
Q3i	Cuaternario	Volcánico	Estratos volcanes y complejos volcánicos
PI3	Pleistoceno	Volcánico	Secuencias lávicas y centros volcánicos básicos e intermedios
PI3t	Pleistoceno	Volcánico	Depósitos piroclásticos principalmente riolíticos
PPI3	Plioceno-Pleistoceno	Volcanosedimentario continental	Secuencias y centros volcánicos parcialmente erodados
M3i	Mioceno Inferior-Medio	Volcánico	Complejos volcánicos parcialmente erosionados y secuencias volcánicas
Mg	Mioceno (18-6 Ma)	Plutónico	Granodioritas, dioritas y tonalitas
Mimg	Mioceno Inferior-Medio (22-16 Ma)	Plutónico	Granodioritas, monzogranitos, monzodioritas, monzonitas y dioritas de biotita y hornblenda
OM2c	Oligoceno-Mioceno	Volcanosedimentario	Secuencias volcanosedimentarias
KT2	Cretácico Superior-Terciario Inferior	Volcanosedimentario	Secuencias volcanosedimentarias

Fuente: SERNAGEOMIN (2003). Elaboración propia

Figura 4. Mantos de derrubios en laderas de la cabecera del estero Pirquinco



Fuente: Archivo del autor. Laguna Pirquinco, Alto Biobío, octubre 2024.

1.5.2. Caracterización de remociones en masa inducidas por lluvias e identificación de dependencia de la trayectoria

La caracterización de RM inducidas por lluvias y la identificación de la dependencia de la trayectoria requieren, en primer lugar, un inventario cartográfico que detalle la morfología de las RM, asociando su ocurrencia con eventos específicos de lluvias. Posteriormente, la dependencia de la trayectoria, observable en cortes de 2 años, requiere la identificación de superposiciones entre las morfologías de RM anteriores y posteriores. Todo lo anterior justifica la elaboración de un inventario de RM geomorfológico de eventos, definido como la cartografía de RM provocadas por un único factor desencadenante como precipitaciones, terremotos y deshielos rápidos (Guzzetti et al., 2012).

Este estudio se ha basado en la integración complementaria de tres enfoques para la cartografía de RM:

1. Detección rápida de RM potenciales: mediante el análisis de cambios en la intensidad de retrodispersión utilizando datos multi-temporales de radar de apertura sintética (SAR) de los satélites Sentinel-1 en Google Earth Engine (GEE).
2. Enfoque heurístico o interpretación visual: basado en imágenes ópticas de Sentinel-2 para realizar una validación preliminar de las RM (Handwerger et al., 2022).
3. Cartografía geomorfológica de campo: orientada a la validación final del inventario.

1.5.2.1. Detección de remociones en masa con SAR S1 en GEE

RADAR es el acrónimo de Radio Detection and Ranging. Se trata de un sistema activo de teledetección que emite pulsos de microondas hacia el suelo o la atmósfera, midiendo el tiempo que tarda en recibir el eco reflejado de vuelta al instrumento, así como la intensidad de la señal dispersada. Los pulsos pueden atravesar nubes, lo que permite obtener imágenes de la superficie terrestre en cualquier condición atmosférica (Strahler, 2013).

El radar puede medir tanto la amplitud como la fase de la señal reflejada. La amplitud se refiere a la magnitud del eco reflejado, mientras que la fase indica la posición de un punto en un momento específico del ciclo de la onda (National Aeronautics and Space Administration [NASA], 2017).

El Radar de Apertura Sintética (SAR, por sus siglas en inglés) es una tecnología de radar activa que utiliza el movimiento de la plataforma (por ejemplo, satélites o aviones) para mejorar la resolución en la dirección azimutal, es decir, a lo largo de la trayectoria del radar. Antes del descubrimiento del SAR, los radares de imágenes operaban bajo el principio de apertura real y eran conocidos como radares de apertura lateral (SLAR). A diferencia del radar de apertura real (RAR), que depende únicamente del tamaño físico de la antena para lograr la resolución, el SAR emplea el análisis de las frecuencias Doppler generadas por el movimiento de la plataforma, lo que permite obtener imágenes de alta resolución sin necesidad de aumentar el tamaño de la antena (Jet Propulsion Laboratory, n.d.).

Los datos SAR pueden analizarse con técnicas interferométricas como InSAR (Radar de Apertura Sintética Interferométrico) y DinSAR (Radar de Apertura Sintética Interferométrico Diferencial). InSAR es la técnica básica de interferometría radar que utiliza dos imágenes SAR adquiridas desde posiciones ligeramente diferentes para generar un interferograma, que representa las diferencias de fase entre ambas imágenes (NASA, 2017). Se utiliza principalmente para la creación de modelos de elevación del terreno, como el SRTM (Rabus et al., 2003). DinSAR es una extensión de InSAR que se enfoca en analizar cambios en la superficie terrestre entre dos o más imágenes SAR adquiridas en diferentes momentos (NASA, 2017). Es una técnica utilizada para cartografiar el desplazamiento de la superficie terrestre desde el espacio, con una resolución espacial fina en grandes áreas (García-Davalillo et al., 2014). Tanto InSAR como DinSAR se han utilizado para monitorear deformaciones lentas en pendientes asociadas a RM (Fustos et al., 2017; García-Davalillo et al., 2014). Sin embargo, debido a las limitaciones en la resolución, la geometría de adquisición y la complejidad en el procesamiento de los datos SAR, existe una restricción en la identificación y mapeo de movimientos de masa de pequeño y mediano tamaño (Guzzetti et al., 2012).

Recientemente, se está explorando un nuevo enfoque para la detección rápida de RM inducidas por diferentes eventos. Este método se basa en la medición de cambios en la retrodispersión de las microondas con SAR, utilizando apilamientos de imágenes (Handwerger et al., 2020; Handwerger et al., 2022; Nugroho et al., 2021; Peters et al., 2024). En comparación con InSAR, este enfoque presenta principalmente dos ventajas: (1) es un método efectivo para detectar RM en áreas montañosas con vegetación densa, donde otros métodos pueden ser menos efectivos (Jung & Yung, 2020; Handwerger et al., 2022), y (2) los datos SAR del satélite COPERNICUS S1 están disponibles a través de Google Earth Engine (GEE), una plataforma gratuita en línea basada en la nube, lo que

elimina la necesidad de software especializado en SAR o la descarga de grandes volúmenes de datos a sistemas locales (Nugroho et al., 2021; Handwerger et al., 2022).

La retrodispersión es la medida del eco reflejado en la dirección de la antena del pulso emitido por el radar (NASA, 2017). Este eco contiene información sobre la superficie que depende de: (1) las características del radar, como el ángulo de la onda incidente, la frecuencia o longitud de onda, y la polarización de la onda; y (2) las características de la superficie, como la constante dieléctrica, la aspereza en relación con la longitud de onda, y la estructura y orientación de los objetos en la superficie (NASA, 2017). La constante dieléctrica es una medida de la cantidad de energía eléctrica que una sustancia deja pasar a través de sí misma (Ungvarsky, 2023).

GEE proporciona imágenes de coeficiente de intensidad de retrodispersión de nivel-1 S1 detectado a distancia del suelo (GRD) que son escenas sometidas a calibración radiométrica y ortorectificadas. Todos los valores S1 GRD se proporcionan en unidades logarítmicas de decibelios (dB). GEE procesa todas las imágenes habilitadas en vuelo ascendente (asc) y descendente (desc) y proporciona imágenes GRD con una resolución espacial de 10 m y en 4 modos de polarización: (1) transmisión vertical/recepción vertical (VV), (2) transmisión horizontal/recepción horizontal (HH), transmisión vertical/recepción horizontal (VV + VH) y transmisión horizontal/recepción vertical (HH + HV). La utilización de las polarizaciones cruzadas VH y HV son sensibles a la biomasa forestal, por lo que son útiles para identificar RM en áreas con vegetación (Handwerger et al., 2022).

El enfoque planteado ha demostrado ser exitoso en estudios previos realizados en regiones montañosas como Hokkaido e Hiroshima (Japón), Huong Phung y Quang Nam (Vietnam), y Nueva Zelanda (Handwerger et al., 2022; Peters et al., 2024), Indonesia (Nugroho et al., 2021), y Noruega (Lindsay et al., 2022).

A pesar de sus ventajas, el enfoque basado en SAR y GEE tiene limitaciones (Handwerger et al., 2022) que conviene considerar:

- La detección de RM mejora con el tiempo al acumular imágenes SAR posteriores al evento, pero la disponibilidad de datos no es uniforme en todo el mundo.
- La resolución espacial limita la detección de RM menores a 20 m de longitud o ancho.
- GEE impone restricciones computacionales que pueden dificultar el procesamiento de áreas extensas (>3.500 km²).
- Las regiones con cambios estacionales significativos posiblemente requieran utilizar imágenes de la misma temporada para evitar sesgos.

Para superar estas limitaciones en el área de estudio (6.387 km²), se dividió en 16 subáreas siguiendo la grilla G del Instituto Geográfico Militar (IGM) a escala 1:50.000 (Figura 3). Esto permitió procesar los datos de manera eficiente en GEE.

Si bien en el área de estudio los cambios estacionales son significativos para la detección de RM, se ha optado por la estrategia de utilizar todos los datos disponibles, ya que Handwerger et al. (2022) se ha comprobado que la precisión en la construcción de inventarios mejora con la cantidad de imágenes adicionales al evento y que esta adición suaviza la estacionalidad eficazmente. Sin

embargo, se reconoce que el factor de la estacionalidad puede ser determinante cuando el objetivo del enfoque es una detección rápida; 1 o 2 semanas después del evento de RM.

1.5.2.1.1. Identificación de fechas en que ocurrieron eventos de lluvias intensas en el 2023 y 2024

La identificación de fechas de lluvias intensas en 2023 y 2024 se ha realizado consultando el Informe Anual de Agua Caída de la Dirección Meteorológica de Chile, correspondiente a la estación María Dolores, Los Ángeles Ad. (370033), disponible en la URL <https://www.meteochile.gob.cl/>. La estación María Dolores, ubicada a 50 km al oeste del área de estudio, se encuentra a una altitud de 118 metros en el valle central (37° 24'04" S, 72° 25'28" W). Se eligió porque es la estación con los datos pluviométricos más completos y cercanos al área de estudio.

1.5.2.1.2. Generación de mapas de cambios en la intensidad de retrodispersión SAR en GEE.

La identificación de RM se ha realizado utilizando el script de Handwerger et al. (2022) disponible en la URL https://github.com/alhandwerger/GEE_scripts_for_Handwerger_et_al_2022_NHESS.

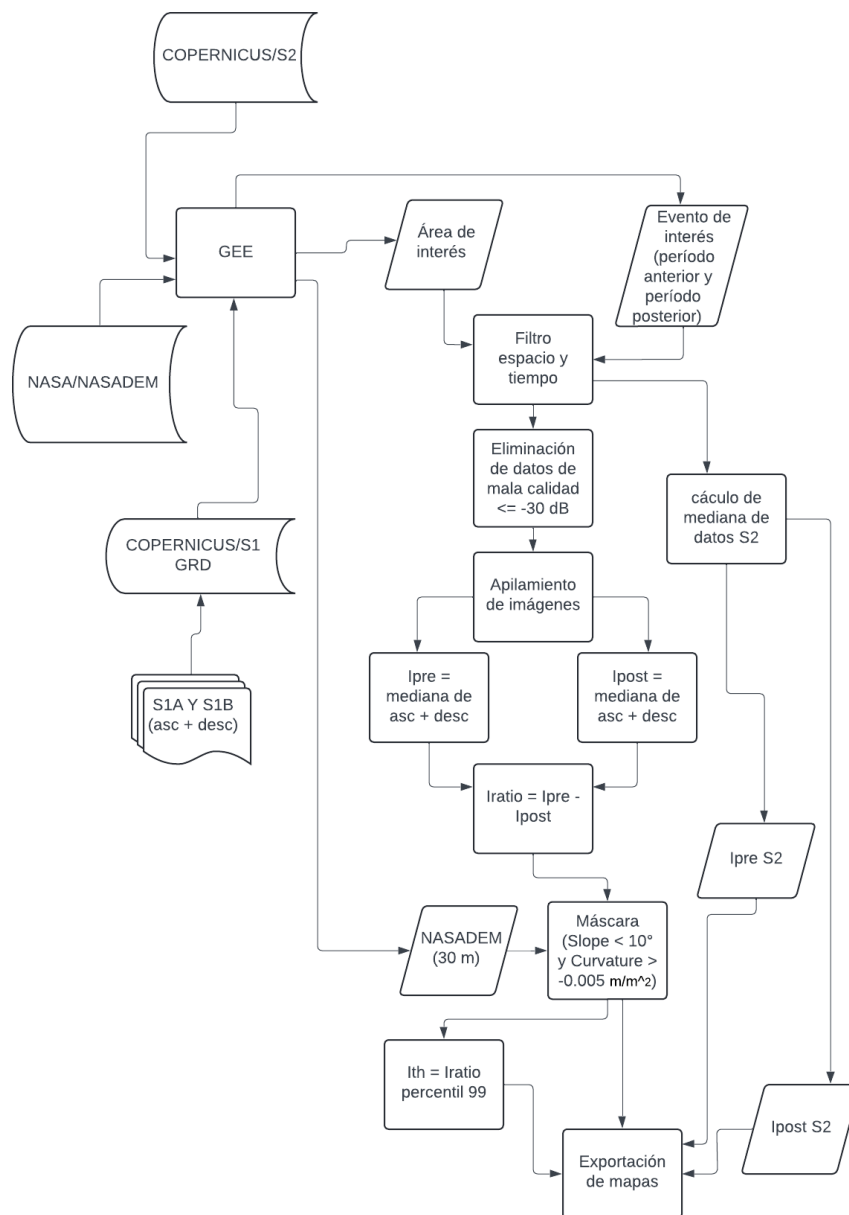
El script de GEE procesa tanto datos ascendentes como descendentes, utilizando la polarización VH y filtrando por área de interés (ADI) y evento de interés (EDI). El EDI se define a partir de una selección de datos de un período anterior y un período posterior. Luego, elimina los datos de mala calidad y ruido inferiores e iguales a -30 dB, siguiendo las especificaciones del catálogo de datos S1 de GEE. A continuación, se genera un apilamiento de imágenes para un evento previo (Ipre) y un evento posterior al EDI (Ipost) (Figura 4). El apilamiento de imágenes mejora significativamente la señal-ruido y se generan datos de retrodispersión más representativos de las propiedades de la superficie antes y después del EDI. Cada pila se calcula como la mediana temporal de los datos SAR previos y posteriores al EDI. El código construye pilas de imágenes combinando datos ascendentes, descendentes, y ascendentes y descendentes. La combinación de datos ascendente y descendente se realiza calculando la mediana de las pilas ascendentes y las pilas descendentes.

La detección de posibles RM se hace evaluando el cambio en el coeficiente de retrodispersión (Iratio) que se calcula como $I_{pre} - I_{post}$. Iratio puede ser positivo o negativo. Los valores positivos indican una reducción de la intensidad de retrodispersión post evento.

Se han utilizado 3 estrategias del código para mejorar la exactitud en la detección de RM. Primero, se han eliminado las áreas donde la probabilidad de que ocurran RM sea baja: superficies planas y cimas de colinas, laderas con pendientes inferiores a 10° y curvaturas superiores a -0,005 m/m², respectivamente, a partir de un conjunto de datos NASADEM con resolución de 30 m. Segundo, el Iratio clasificado en percentiles se ha considerado como posible RM a partir del percentil 99 (Ith), ya que en Handwerger et al. (2022) se concluye que resaltan mejor las RM verdaderas y se reduce en gran medida los falsos positivos. Tercero, a partir de un conjunto de imágenes sentinel-2 con el mismo filtro espacial y temporal aplicado a los datos SAR, se ha generado una imagen para el momento previo (Ipre S2), y otra, posterior al evento (Ipost S2), mediante el cálculo de la mediana,

para una interpretación cualitativa de las imágenes en contraste con los valores Iratio y Percentil 99% Iratio (Ith). Para esto último se exportaron los mapas de Ipre S2, Ipost S2, Iratio e Ith (Figura 5).

Figura 5. Diagrama de flujo de detección de remociones en masa en GEE con SAR S1



Elaboración propia

1.5.2.2. Elaboración del inventario de remociones en masa

La elaboración del inventario ha consistido en utilizar como insumo los mapas generados en GEE y, luego, realizar las siguientes etapas: 1) contrastarlos con imágenes satelitales, 2) cartografiar las RM según el sistema de clasificación de Varnes (Hung et al., 2014), y 3) obtener en terreno el mayor detalle posible de la morfología de las RM y su contexto geomorfológico.

1.5.2.2.1. Comparación de mapas con imágenes satelitales

Los mapas de Iratio y Percentil 99% Iratio se comparan con los mapas de Ipre S2, Ipost S2 y los mosaicos de imágenes satelitales de Google Earth y World Imagery de ArcGIS Pro que alcanzan hasta 1 m de resolución. De esta manera se complementa la detección de lo considerado como posible RM (los mapas de cambios de retrodispersión) con un enfoque heurístico o interpretación cualitativa de la imagen óptica para definir si se trata de una RM o no.

1.5.2.2.2. Digitalización de remociones en masa

Las RM se cartografiaron utilizando ArcGIS Pro. Primero, se creó un archivo de vectorial (shapefile) como capa base para la digitalización. Posteriormente, mediante las herramientas de edición disponibles en la plataforma, se delimitaron polígonos directamente sobre las imágenes satelitales ópticas, representando de forma precisa las áreas afectadas.

En la tabla de atributos del archivo vectorial se crearon diversos campos para organizar y clasificar la información de las RM. Los campos definidos fueron:

- **Tipo:** Clasificación general de la RM.
- **Subtipo:** Categoría más específica dentro del tipo de RM.
- **Materiales:** Composición predominante del material involucrado.
- **Fecha:** Período en el que ocurrió el evento.
- **ID:** Número entero único asignado como identificador de cada RM.
- **ELEVMIN, ELEVMAX y ELEVMEAN:** Elevación mínima, máxima y promedio del área afectada, respectivamente. El cálculo de estos valores se detalla en la subsección de análisis de datos.
- **Validado:** Indica si el evento fue validado en terreno, completándose con “sí” o “no”.
- **Evento:** identificador numérico del evento.
- **Superficie:** Área afectada por la RM, incluyendo el escarpe y el depósito.
- **IGM:** Identificador de la zona en que se subdividió el área de estudio, según la grilla del Instituto Geográfico Militar (IGM).

1.5.2.2.3. Clasificación de remociones en masa

Las tipologías de RM se definieron cualitativamente a partir de las morfologías de las RM cartografiadas, la observación del contexto geomorfológico, las imágenes satelitales y basándose en el sistema de clasificación de Varnes actualizado por Hungr et al. (2014) (Tabla 2) que es la taxonomía estándar y aceptada de RM (Reichenbach et al., 2018).

1.5.2.2.4. Trabajo en terreno

La validación final se realizó mediante un enfoque de cartografía geomorfológica de campo, que generalmente abarca al menos el 15 % del área cubierta por el inventario. Este proceso permite verificar áreas específicas, corregir clasificaciones erróneas y mejorar la precisión general del inventario (Guzzetti et al., 2012).

El procedimiento se basó en una interpretación cualitativa del contexto geomorfológico in situ, lo que permitió realizar observaciones detalladas, como la caracterización de la litología y la identificación de procesos activos en las laderas. En las zonas de acceso restringido, se tomaron fotografías con dron para obtener imágenes detalladas, complementando las observaciones directas.

1.5.2.3. Análisis de datos

1.5.2.3.1. Cálculo de superficies y estadísticas básicas

El área afectada por RM se ha calculado con la herramienta de calculadora de campos en ArcGIS Pro y la estimación de la elevación máxima de la superficie afectada por RM se ha medido mediante la utilización de la herramienta de análisis espacial Zonal Statistics as Table de ArcGIS Pro, utilizando como variables de entrada el inventario de RM y un modelo de elevación digital SRTM de 30 metros.

1.5.2.3.2. Evaluación de superposiciones

La evaluación de superposiciones se realizó mediante un análisis visual para identificar RM dependientes de la trayectoria. Este análisis compara las RM ocurridas en 2023 y 2024, evaluando casos en los que los polígonos de RM de 2024 están total o parcialmente contenidos dentro de los polígonos de RM de 2023, o cuando estos comparten bordes o puntos de contacto.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1. Definiciones relevantes: Remociones en masa

Las remociones en masa (RM) se definen como el movimiento de una masa de roca, escombros o tierra por una pendiente por acción de la gravedad (Cruden, 1991; Cruden & Varnes, 1996). La clasificación estándar y aceptada de Cruden y Varnes (Hungr et al., 2014) identifica 6 tipos básicos según los principales mecanismos implicados (caída, vuelco, deslizamiento, propagación, flujo y deformación) y varios subtipos según el contenido de agua de la masa en movimiento (Tabla 2) (Huggett, 2017):

1. **Caídas:** Implican el desprendimiento, caída, rodado y rebote de fragmentos de roca, hielo o suelo, de manera individual o en grupos, generalmente desde una pendiente empinada. Las caídas de rocas son más comunes, especialmente en paisajes con pendientes rocosas escarpadas y acantilados.
2. **Vuelcos:** Involucran la rotación hacia adelante de roca o suelo sobre un eje o punto situado por debajo del centro de gravedad de la masa desplazada (generalmente en o cerca de la base de la pendiente). Ocurren característicamente en rocas fuertemente fracturadas o inclinadas en losas o columnas.
3. **Deslizamientos:** Son una forma generalizada de RM que ocurre a lo largo de planos de cizallamiento claros y son usualmente diez veces más largos que anchos. Los dos subtipos principales son los deslizamientos rotacionales y traslacionales. Los deslizamientos rotacionales ocurren a lo largo de planos de cizallamientos cóncavos y son comunes en materiales uniformes como arcillas. Los deslizamientos traslacionales ocurren a lo largo de superficies de cizallamientos planos y pueden incluir deslizamientos de rocas y suelo.
4. **Propagación:** Ocurren cuando una masa cohesiva de roca o suelo se licúa debido a la saturación parcial o total. El desencadenante puede ser un terremoto o la eliminación del soporte base. La licuefacción puede extenderse varios kilómetros y retroceder tierra adentro a medida que el hundimiento del terreno perturbado elimina el soporte para el terreno aún intacto.
5. **Flujos:** Implican cizallamiento a través del suelo, roca, nieve o escombros mientras se desplazan sobre una base rígida. La velocidad del flujo es lenta en la base y aumenta hacia la superficie, con movimiento turbulento predominante. Los subtipos incluyen:

- **Avalanchas de roca (Sturzstrom):** Movimiento rápido y masivo de fragmentos de roca desde un gran deslizamiento o caída de rocas, a menudo en montañas.
 - **Flujos de suelo:** Dependiendo del material y su contenido de humedad, se denominan flujo seco, deslizamiento de flujo, flujo de escombros, flujo de lodo, inundación de escombros, avalancha de escombros, flujo de tierra, y flujo de turba.
 - **Lahares:** Flujos de lodo volcánico desencadenados por la saturación de agua en los escombros de las laderas de los volcanes, como el lahar del Monte St. Helens en 1980, que se desplazó 60 km y causó grandes daños.
6. **Deformación de la pendiente:** Ocurre de varias formas y depende de factores como la gravedad, la meteorización, y la alteración del material rocoso. Los tipos incluyen:
- **Deformación de pendientes de montaña:** Involucra masas de roca altamente estresadas formando pendientes montañosas con características topográficas como escarpes, bancos, grietas y protuberancias. La meteorización y la alteración reducen progresivamente la resistencia de la montaña, causando deformaciones gravitacionales y la aparición de grandes fracturas que pueden derivar en RM.
 - **Deformación de pendientes de suelo:** Es una deformación profunda, lenta a extremadamente lenta, de laderas formadas por suelos cohesivos, a menudo en zonas de permafrost con alto contenido de hielo
 - **Reptación del suelo:** Movimiento muy lento de las capas superiores del suelo en una pendiente, generalmente <1 m de profundidad, resultante de ciclos de expansión y contracción causados por procesos como la congelación y descongelación, cambios de humedad y temperatura, y actividades biológicas.
 - **Solifluxión:** Movimiento lento pero intenso de suelo saturado de agua sobre terreno congelado durante el verano en ambientes periglaciares, formando lóbulos característicos de solifluxión.

Tabla 2. Clasificación de Varnes de tipos de remociones en masa actualizada

Tipo de movimiento	Roca	Suelo
Caída	1. Caída de roca y hielo ^a	2. Boulder, escombros, limo ^a
Vuelco	3. Vuelco de bloque de roca ^a	5. Grava, arena, limo ^a
	4. Vuelco por flexión de rocas	
Deslizamiento	6. Deslizamiento rotacional de roca	11. Deslizamiento rotacional de arcilla y limo
	7. Deslizamiento traslacional de roca ^a	12. Deslizamiento traslacional de arcilla y limo
	8. Deslizamiento en cuña ^a	13. Grava, arena, escombros y deslizamiento ^a
	9. Deslizamiento compuesto de roca	14. Deslizamiento compuesto de arcilla y limo
	10. Deslizamiento irregular de roca ^a	
Propagación	15. Propagación de pendiente rocosa	16. Propagación de arena, limo y licuefacción ^a
		17. Extensión de arcilla sensible ^a
Flujo	18. Avalancha de roca y hielo ^a	19. Flujo seco de arena, limo y escombros
		20. Flujo de arena, limo y escombros ^a
		21. Flujo de arcilla sensible ^a
		22. Flujo de escombros ^a
		23. Flujo de barro ^a
		24. Inundación de escombros
		25. Avalancha de escombros ^a
		26. Flujo de tierra
Deformación de la pendiente	28. Deformación de pendiente montañosa	30. Deformación de suelo de pendiente
	29. Deformación de pendiente rocosa	31. Reptación de suelo
		32. Solifluxión

^a Tipos de movimiento que suelen alcanzar velocidades extremadamente rápidas. Los demás tipos suelen ser, aunque no siempre, de extremadamente lento a muy rápidos.

Fuente: Hungr et al. (2014). Elaboración propia

2.2. Estudios de referencia

2.2.1. Detección de remociones en masa midiendo cambios de intensidad de retrodispersión con SAR S1 en GEE

El radar de apertura sintética (SAR) basado en satélites ofrece ventajas significativas para la detección de RM, ya que puede penetrar nubes, operar tanto de día como de noche, y proporciona datos globales de forma regular. Recientemente se han desarrollado varios trabajos que buscan aprovechar las ventajas del uso de datos de SAR Sentinel-1 (S1) y su procesamiento en Google Earth Engine (GEE) para la identificación de RM a través de la detección de cambios en la intensidad de retrodispersión.

Handwerger et al. (2020) han presentado un enfoque basado en SAR para la detección de cambios en la amplitud o intensidad de la retrodispersión, utilizando datos de S1 en GEE, diseñado para usuarios sin experiencia en SAR y que permite la identificación de RM en áreas afectadas por eventos desencadenantes como precipitaciones de manera rápida, hasta 1 semana después del evento, demostrando que la técnica mejora con el incremento del número de imágenes SAR adquiridas antes y después del evento, combinando datos de adquisición ascendente y descendente junto con máscaras topográficas.

Posteriormente, a partir de la técnica anterior, Handwerger et al. (2022) han desarrollado un enfoque para generar mapas de densidad de RM, permitiendo además la identificación de áreas posiblemente afectadas por RM. Ambos métodos permiten una respuesta rápida a eventos de RM y la creación de inventarios de eventos sin la necesidad de descargar grandes volúmenes de datos o software especializado.

Nugroho et al. (2022) han comparado la efectividad de los datos de S1 y S2 en la identificación de RM utilizando GEE. Aunque los datos ópticos de S2 han ofrecido una mayor precisión en la cartografía de RM, S1, con su capacidad para operar en todas las condiciones climáticas y de iluminación, ha demostrado ser más eficaz en la detección rápida de RM post-evento.

Lindsay et al. (2022) han desarrollado un enfoque de imágenes multi-temporales compuestas de S1 y S2 en GEE, mejorando la visibilidad de las RM, utilizando cambios de NDVI y la intensidad de retrodispersión.

Peters et al. (2022) han propuesto el uso de un enfoque basado en aprendizaje automático para la detección de RM cosísmicas, integrando datos ópticos y de radar de S1, Palsar-2 y S2 en GEE, logrando una alta precisión y permitiendo la adaptación a otros eventos desencadenantes de RM sin necesidad de datos adicionales de entrenamiento.

2.2.2. Remociones en masa dependientes de la trayectoria

Samia et al. (2017) definen el concepto de dependencia de la trayectoria, adoptado de la teoría de sistemas complejos, para describir el efecto heredado entre RM antiguas y posteriores, donde las primeras actúan como iniciadoras de las segundas durante cierto período. En un inventario de RM multitemporal que abarca casi 60 años y un área de 78,9 km², en Collazzone, Italia, han observado que este efecto heredado no sigue un patrón lineal de causa-efecto, sino que sigue un comportamiento crítico autoorganizado que se puede definir como la “salida” de una serie de eventos que siguen una distribución de tamaño de frecuencia que se ajusta a la ley de potencia, respecto de una “entrada” constante en un sistema complejo (Guzzetti et al., 2002). En efecto, todo el potencial de una RM no se elimina con una RM, sino que las primeras RM, en algunos casos, aumentan el potencial de RM posteriores (Samia et al., 2017).

Las RM dependientes de la trayectoria se han observado en otras regiones como en el norte del volcán Aso, Japón (Yano et al., 2019), la meseta de Heifangtai, China (Yang et al., 2021) y en los Himalayas, Nepal (Roberts et al., 2021). De acuerdo con Roberts et al. (2021) la observación de la dependencia de la trayectoria es posible de determinar en cortes de 2 años a lo largo de 10 años y al menos 5, con una resolución de 30 m.

La dependencia de la trayectoria tiene implicancias en la modelación de la susceptibilidad por RM, ya que el efecto heredado tiene consecuencias considerables en el área afectada por RM, aumentando la susceptibilidad por un período determinado y se ha demostrado que su inclusión en la modelación de susceptibilidad puede mejorar su rendimiento (Samia et al., 2020).

3. RESULTADOS

Los resultados del trabajo, estructurados en tres etapas principales: 1) detección de remociones en masa (RM), 2) inventario de RM y 3) análisis de datos, se presentan de la siguiente manera:

En primer lugar, se describen las características de los eventos de lluvia identificados, incluyendo su duración, precipitación acumulada e intensidad promedio, realizando un contraste entre estos. Además, se detalla el periodo de interés definido en el script de Google Earth Engine (GEE), especificando las fechas anteriores y posteriores utilizadas, junto con la cantidad de imágenes SAR procesadas en cada período para calcular el Iratio.

En segundo lugar, se presentan los tipos y cantidades de RM cartografiadas, complementados con los resultados obtenidos durante la validación en terreno.

Finalmente, se analizan las áreas afectadas por las RM, destacando la superficie involucrada, la elevación máxima alcanzada y su distribución espacial según las grillas del Instituto Geográfico Militar (IGM).

3.1. Detección de remociones en masa

3.1.1. Eventos de lluvias intensas (2023-2024)

A partir de los datos de precipitación registrados en la estación María Dolores, Los Ángeles, se identificaron 4 eventos de lluvias intensas: 3 en el año 2023 y 1 en el año 2024 (Figura 6 y Tabla 3).

Eventos identificados en 2023:

1. Evento 1:

- **Duración:** 5 días (21 al 25 de junio).
- **Precipitación acumulada:** 88,5 mm.
- **Intensidad promedio:** 17,7 mm/día.

2. Evento 2:

- **Duración:** 2 días (20 al 21 de julio).
- **Precipitación acumulada:** 127,4 mm.
- **Intensidad promedio:** 63,7 mm/día.

3. Evento 3:

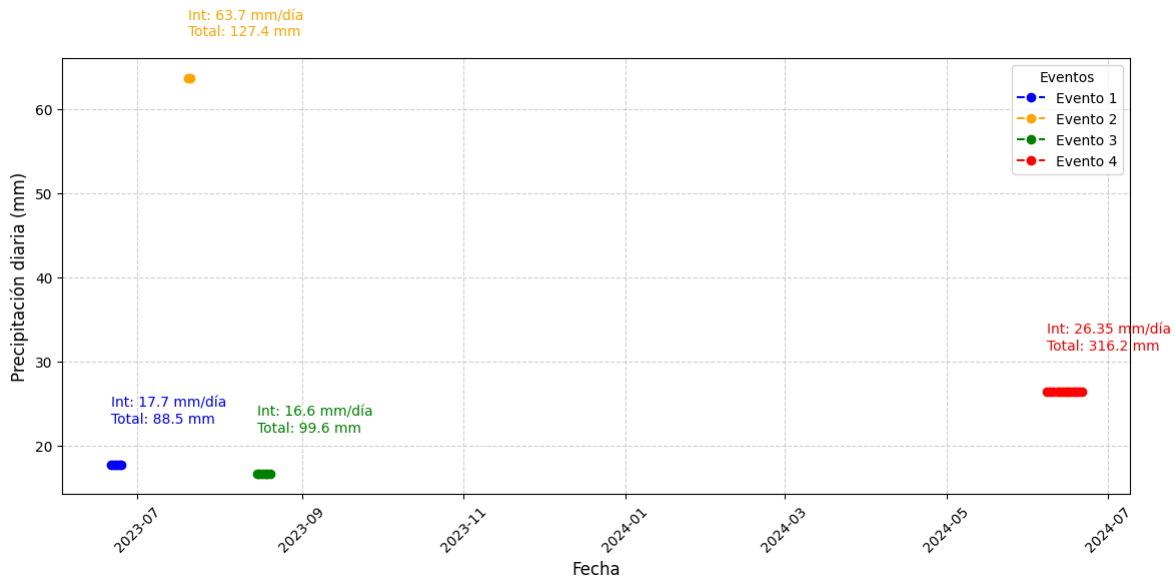
- **Duración:** 6 días (15 al 20 de agosto).
- **Precipitación acumulada:** 99,6 mm.
- **Intensidad promedio:** 16,6 mm/día.

Evento identificado en 2024:

4. Evento 4:

- **Duración:** 13 días (8 al 21 de junio).
- **Precipitación acumulada:** 316,2 mm.
- **Día sin registro de lluvias:** 15 de junio.
- **Intensidad promedio:** 26,35 mm/día.

Figura 6. Comparación entre eventos de lluvias intensas identificados entre 2023 y 2024 en la estación María Dolores



Elaboración propia

Tabla 3. Eventos de lluvias intensas identificados entre 2023 y 2024 en la estación María Dolores

Evento	Año	Duración	Precipitación acumulada (mm)	Intensidad promedio (mm/día)	Días sin registro de lluvias
1	2023	21 al 25 de junio	88,5	17,7	
2	2023	20 al 21 de julio	127,4	63,7	
3	2023	15 al 20 de agosto	99,6	16,6	
4	2024	8 al 21 de junio	316,2	26,35	15 de junio

Elaboración propia

3.1.2. Remociones en masa identificadas mediante datos SAR S1 en GEE

3.1.2.1. *Períodos anteriores y posteriores a los Eventos de Interés (EDI)*

A continuación, se detallan las fechas correspondientes a los períodos anteriores y posteriores de los cuatro eventos de interés (EDI) identificados (Tabla 4):

Evento 1:

- Período anterior: 1 de junio de 2022, 23:59 horas, al 20 de junio de 2023, 23:59 horas.
- Período posterior: 25 de junio de 2023, 23:59 horas, al 2 de febrero de 2024, 23:59 horas.

Evento 2:

- Período anterior: 1 de junio de 2022, 23:59 horas, al 19 de julio de 2023, 23:59 horas.
- Período posterior: 21 de julio de 2023, 23:59 horas, al 2 de febrero de 2024, 23:59 horas.

Evento 3:

- Período anterior: 1 de junio de 2022, 23:59 horas, al 14 de agosto de 2023, 23:59 horas.
- Período posterior: 20 de agosto de 2023, 23:59 horas, al 2 de febrero de 2024, 23:59 horas.

Evento 4:

- Período anterior: 1 de junio de 2022, 23:59 horas, al 7 de junio de 2024, 23:59 horas.
- Período posterior: 21 de junio de 2024, 23:59 horas, al 24 de septiembre de 2024, 23:59 horas.

Tabla 4. Períodos de eventos de interés para el código GEE y detección de remociones en masa

Evento	Período anterior	Período posterior
1	1 de junio de 2022 - 20 de junio de 2023	25 de junio de 2023 - 2 de febrero de 2024
2	1 de junio de 2022 - 19 de julio de 2023	21 de julio de 2023 - 2 de febrero de 2024
3	1 de junio de 2022 - 14 de agosto de 2023	20 de agosto de 2023 - 2 de febrero de 2024
4	1 de junio de 2022 - 7 de junio de 2024	21 de junio de 2024 - 24 de septiembre de 2024

Elaboración propia

3.1.2.2. *Cantidad de imágenes SAR apiladas para la identificación de RM por evento*

A continuación, se detalla el número de imágenes SAR apiladas para cada evento, distinguiendo entre los períodos anteriores y posteriores al EDI (Tabla 5 y Anexo 1):

Evento 1:

- **Período anterior:**
 - Total: **1.307** imágenes.
 - Ascendentes: **526**.
 - Descendentes: **781**.
- **Período posterior:**
 - Total: **922** imágenes.
 - Ascendentes: **393**.
 - Descendentes: **529**.

Evento 2:

- **Período anterior:**
 - Total: **1.400** imágenes.
 - Ascendentes: **567**.
 - Descendentes: **833**.
- **Período posterior:**
 - Total: **801** imágenes.
 - Ascendentes: **340**.
 - Descendentes: **461**.

Evento 3:

- **Período anterior:**
 - Total: **1.530** imágenes.
 - Ascendentes: **626**.
 - Descendentes: **904**.
- **Período posterior:**
 - Total: **702** imágenes.
 - Ascendentes: **300**.
 - Descendentes: **402**.

Evento 4:

- **Período anterior:**
 - Total: **2.596** imágenes.
 - Ascendentes: **1.087**.
 - Descendentes: **1.509**.
- **Período posterior:**
 - Total: **344** imágenes.

- Ascendentes: **157**.
- Descendentes: **187**.

Tabla 5. Cantidad de imágenes SAR apiladas para la detección de remociones en masa en cada evento

Evento	Período	Imágenes totales	Ascendentes	Descendentes
1	Anterior	1.307	526	781
	Posterior	922	393	529
2	Anterior	1.400	567	833
	Posterior	801	340	461
3	Anterior	1.530	626	904
	Posterior	702	300	402
4	Anterior	2.596	1.087	1.509
	Posterior	344	157	187

Elaboración propia

3.2. Inventario de remociones en masa

3.2.1. Tipos y cantidad de remociones en masa cartografiadas

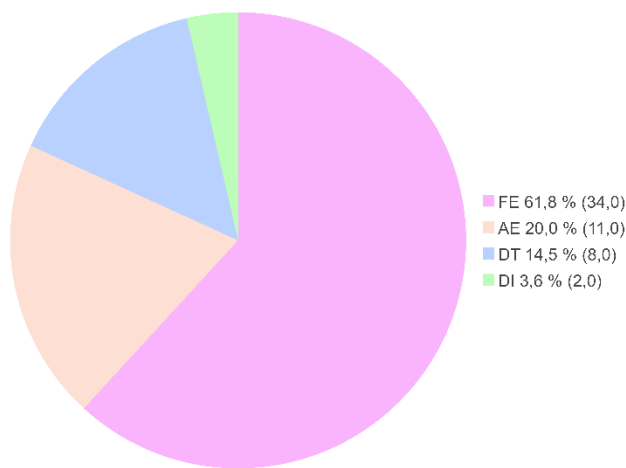
En total se identificaron 55 RM, 8 deslizamientos traslacionales, 2 deslizamientos indiferenciados, 34 flujos de escombros y 11 avalanchas de escombros (Figura 7).

El 85 % del total de RM ocurrió en el evento 1 y el 15 % restante en el evento 3.

En el evento 1 se cartografiaron en total 47 RM que se desglosan en 7 deslizamientos traslacionales, 1 deslizamiento indiferenciado, 29 flujos de escombros y 10 avalanchas de escombros.

En el evento 3 se cartografiaron en total 8 RM que se desglosan en 1 deslizamiento traslacional, 1 deslizamiento indiferenciado, 5 flujos de escombros y 1 avalancha de escombros.

Figura 7. Distribución de tipos de remociones en masa del inventario elaborado



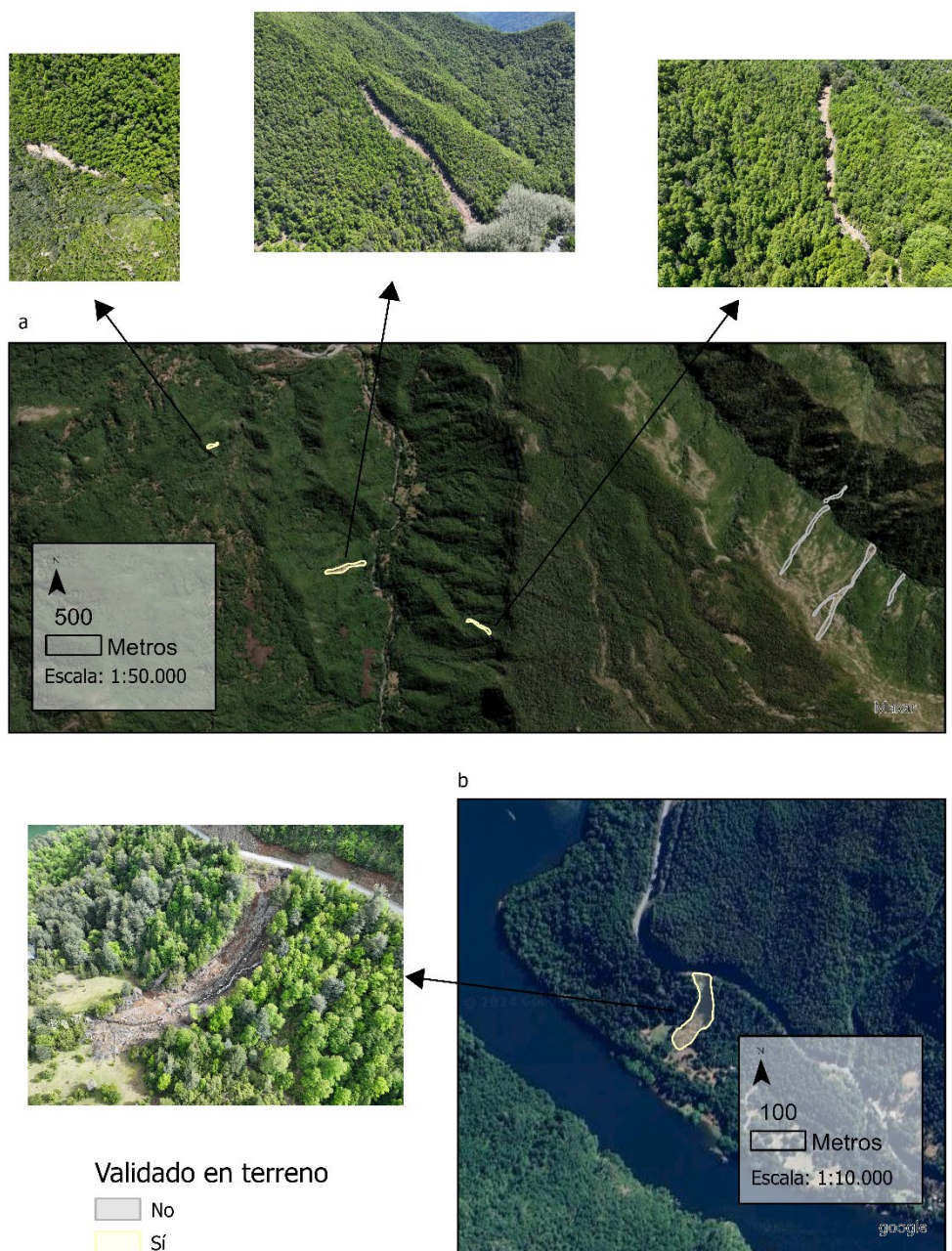
Tipos de RM: (FE) flujo de escombros, (AE) avalanchas de escombros, (DT) deslizamientos traslacionales y (DI) deslizamientos indiferenciados. Elaboración propia.

3.2.2. Validación en terreno

En el trabajo en terreno se validó un 7 % del total del inventario (Figura 8). Este bajo número de validaciones se debió, principalmente, al difícil acceso a las áreas cartografiadas con RM y limitaciones técnicas para fotografiar con dron.

En Santa Lucía Alto, Yungay, se verificó la existencia de 3 escarpes de flujos de escombros, ubicados en los valles perpendiculares al río Cholguán. En la laguna Pirquinco, no se pudo realizar el vuelo de dron por problemas técnicos. Y en la ruta Q-689, a la altura del estero las Carpas, Volcán Callaqui, el trabajo de campo permitió caracterizar de manera más precisa un deslizamiento traslacional de escombros, observándose en los taludes de las laderas del valle depósitos mal seleccionados, caracterizados por clastos de bloques angulosos soportados en una matriz de suelo residual. Estos depósitos coluviales, originados de flujos de escombros o lahares, por sus características, conforman laderas inestables muy propensas a caídas de rocas (Figura 9).

Figura 8. Fotografías de remociones en masa inventariadas que se validaron en terreno en octubre



Vistas de áreas relevantes en el estudio. (a) Valles perpendiculares al río Cholgúan. (b) Ruta Q-689, a la altura del estero Las Carpas, en las cercanías del volcán Callaqui. Elaboración propia.

Figura 9. Contexto geomorfológico de una remoción en masa validada en terreno: Taludes de depósitos mal seleccionados en la ruta Q-689



Elaboración propia

3.3. Análisis de datos

3.3.1. Área afectada por remociones en masa y elevación máxima

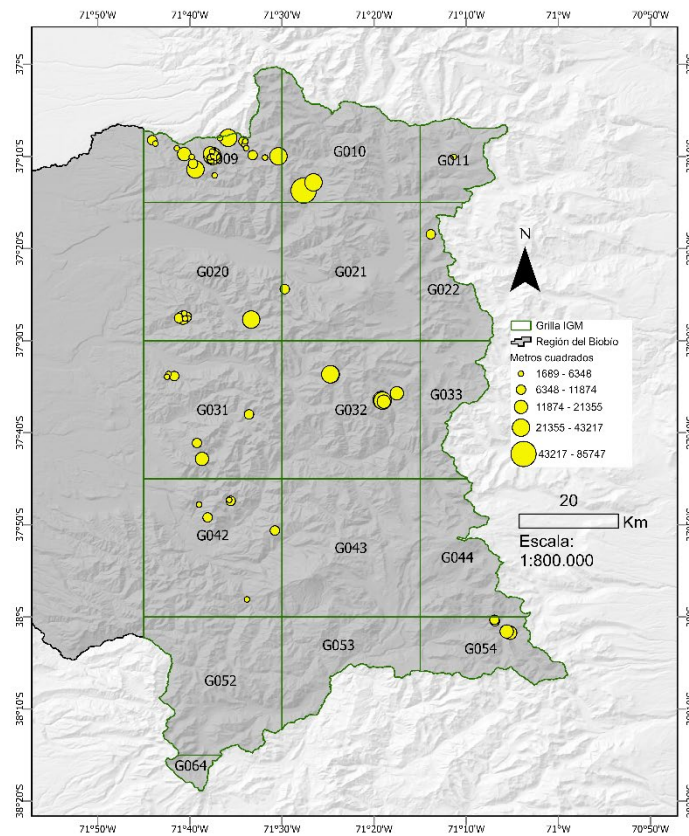
El área total afectada por RM es de 784.708 m², lo que equivale a un 0,012 % del área de estudio. El desglose de la superficie total por RM es el siguiente: 45.652 m² por deslizamiento de traslacionales, 9.056 m² por deslizamientos indiferenciados, 511.131 m² por flujos de escombros y 298.687 m² por avalanchas de escombros.

En el evento 1 el área total afectada fue de 715.118 m², el 91 % del total. 38.600 m² fueron afectados por deslizamientos traslacionales, 3.999 m² por deslizamientos indiferenciados, 475.188 m² por flujos de escombros y 197.331 m² por avalanchas de escombros.

En el evento 3 el área total afectada fue de 69.590 m², 7.052 m² fueron afectados por 1 deslizamiento traslacional, 5.057 m² por 1 deslizamiento indiferenciado, 36.125 m² por 5 flujos de escombros y 21.356 m² por 1 avalancha de escombros.

El área mínima cartografiada en el inventario fue de 1.689 m² correspondiente a un deslizamiento traslacional de suelo, mientras que el área máxima cartografiada afectada por una RM fue de 85.747 m² correspondiente a 1 flujo de escombros (Figura 10).

Figura 10. Área de afectación de las remociones en masa inventariadas



Elaboración propia

El valor mínimo, máximo y promedio del área afectada por cada subtipo de RM es el siguiente:

- **Deslizamientos traslacionales:**
 - Mínimo: **1.689 m²**.
 - Máximo: **8.614 m²**.
 - Promedio: **5.707 m²**.
- **Deslizamientos indiferenciados:**
 - Mínimo: **3.999 m²**.
 - Máximo: **5.057 m²**.
 - Promedio: **4.528 m²**.
- **Flujos de escombros:**
 - Mínimo: **2.446 m²**.
 - Máximo: **85.747 m²**.

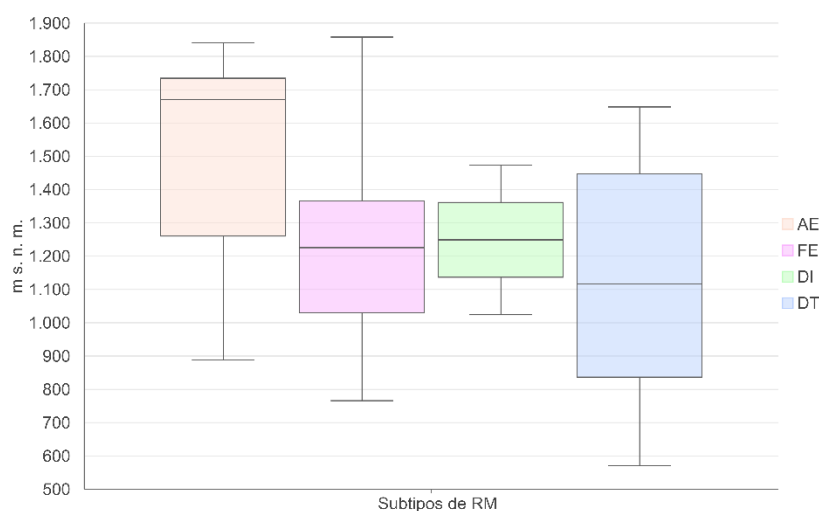
- Promedio: **15.039 m²**.

- **Avalancha de escombros:**

- Mínimo: **2.846 m²**.
- Máximo: **33.352 m²**.
- Promedio: **11.880 m²**.

La elevación máxima que pueden alcanzar los diferentes subtipos de RM en el área de estudio, basados en los datos de SRTM, es la siguiente: 1.646 m s. n. m. para deslizamientos traslacionales; 1.474 m s. n. m. para deslizamientos indiferenciados; 1.858 m s. n. m. para flujos de escombros; y 1.841 m s. n. m. para avalanchas de escombros (Figura 11). Estos valores son específicos para el área de estudio y no deben ser extrapolados a otras zonas cordilleranas.

Figura 11. Distribución de elevación máxima según tipos de remociones en masa del inventario



Tipos de RM: (FE) flujo de escombros, (AE) avalanchas de escombros, (DT) deslizamientos traslacionales y (DI) deslizamientos indiferenciados. Elaboración propia

La elevación máxima de los deslizamientos traslacionales varió entre ~600 y 1.650 m s. n. m., con un promedio de ~1.100 m s. n. m. y un rango intercuartil (IQR) de 611 m; los deslizamientos indiferenciados, en promedio, se produjeron a ~1.250 m s. n. m. y su distribución muestra un IQR de 225 m; los flujos de escombros variaron entre ~800 y 1.850 m s. n. m., y en promedio, se registraron a ~1.200 m s. n. m., con un IQR de 336 m. Por su parte, las avalanchas de escombros variaron entre ~900 y 1.750 m s. n. m., con un IQR de 465 m, y aunque el promedio es de ~1.500 m s. n. m., se

produjeron con mayor frecuencia entre ~ 1.700 y 1.800 m s. n. m., a diferencia del resto de los tipos de RM, en los que el promedio coincide aproximadamente con la moda.

A pesar de que se observa cierta variabilidad en las elevaciones máximas para cada tipo de RM, los rangos de elevación se superponen considerablemente entre los diferentes tipos de deslizamientos y flujos, lo que sugiere que la elevación por sí sola no es un factor decisivo para una clasificación precisa de los tipos de RM. Este solapamiento en las distribuciones limita la posibilidad de establecer una clasificación clara basada únicamente en la elevación. Por lo tanto, es necesario considerar otros factores geomorfológicos para una caracterización más precisa de los diferentes tipos de RM en el área de estudio.

3.3.2. Distribución de áreas afectadas por remociones en masa de acuerdo con grillas del IGM

El Instituto Geográfico Militar (IGM) ha dividido el territorio chileno en secciones, que a su vez se subdividen en zonas o grillas utilizadas para la cartografía base a escala 1:50.000. Dado que el área de estudio abarca una superficie de 6.387 km^2 y Google Earth Engine (GEE) impone restricciones computacionales para el procesamiento de áreas mayores a 3.500 km^2 , se ha optado por subdividir el área de estudio según las grillas del IGM para facilitar la detección y cartografía de RM.

Esta subdivisión no solo permite superar las limitaciones técnicas, sino que también es útil para analizar la distribución de las RM por zonas, destacando los datos más relevantes en coherencia con los objetivos planteados en este trabajo, como se detalla a continuación:

G009 Colonia de Santa Lucía

La región NW del área de estudio fue la más afectada por RM, de acuerdo con la grilla del IGM, corresponde a la zona G009 Colonia de Santa Lucía (Figura 12). En esta zona se cartografiaron en total 21 RM (Figura 13), las que se concentraron en los valles tributarios al río Cholguán. 18 de estas RM corresponden a flujos de escombros que afectaron un área total de 254.456 m^2 , 94 % del área total afectada por RM en G009 y equivalente al 34 % del área total afectada por RM en el área de estudio.

En el extremo oriental de esta zona, en una ladera orientada hacia el este, donde la retención crionival y la cubierta de vegetación de tundra dan cuenta de un ambiente periglaciario, se registró, en el evento 1, el flujo de escombros con la elevación máxima del área de estudio; 1.858 m s. n. m. Este último afectó un área de 32.232 m^2 .

5 RM del total se detectaron en el evento 3; 4 flujo de escombros y 1 deslizamiento indiferenciado, con un área de afectación total de 26.985 m^2 .

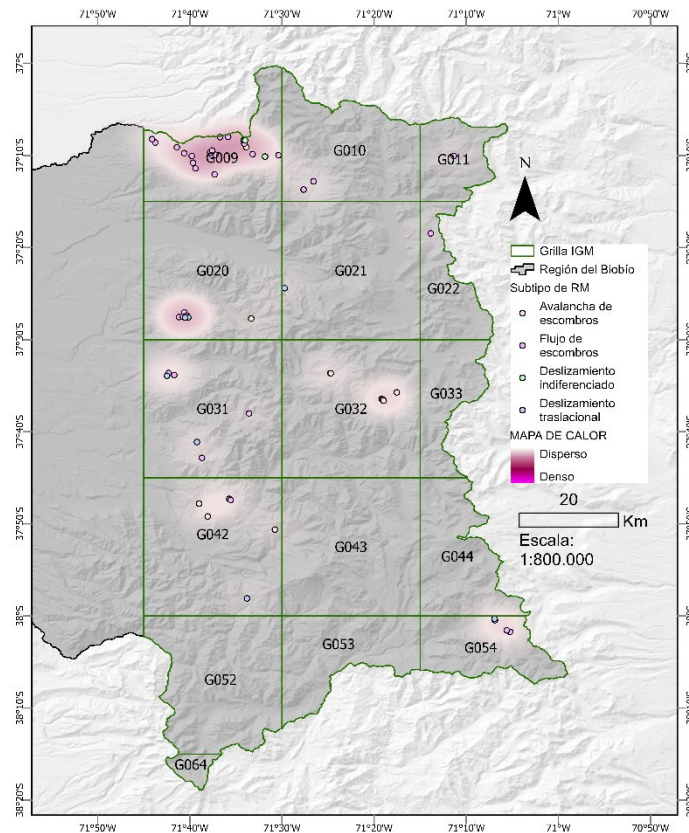
G010 Puntilla Chillán

En la zona G010 Puntilla Chillán se cartografiaron 2 flujos de escombros en total. Ambas RM se detectaron en el evento 1 y se ubican dentro del valle del río Polcura, donde se encuentra la central hidroeléctrica El Toro. Afectaron un área total de 118.622 m². El flujo de escombros ubicado más al sur, en el valle del estero la Mula, corresponde al área máxima cartografiada del área de estudio; 85.747 m².

G011 Cuatro Juntas

En G011 Cuatro Juntas se cartografió un flujo de escombros con un área afectada de 4.961 m² y una elevación máxima de 1.722 m s. n. m.

Figura 12. Superposición de la grilla del IGM sobre el mapa de calor del inventario de remociones en masa



Elaboración propia

G020 Antuco

En G020 Antuco se cartografiaron en total 7 RM, afectando un área total de 72.274 m². 6 RM se detectaron en el evento 1; 2 deslizamientos traslacionales, 3 flujos de escombros y 1 avalancha de escombros, afectando un área total de 58.077 m². En el evento 3 se detectó un flujo de escombros con un área afectada de 14.197 m².

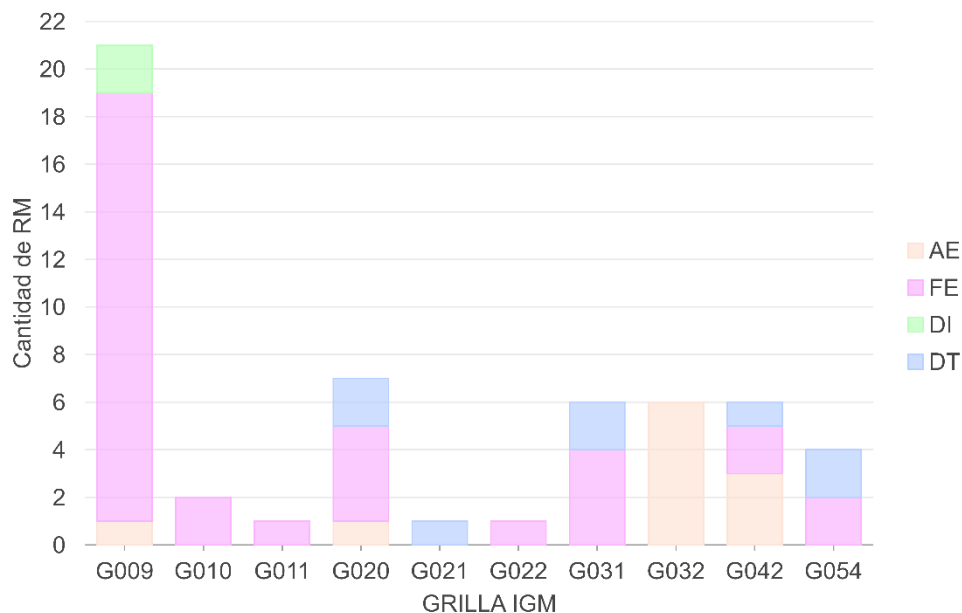
G021 Laguna de la Laja

En G021 Laguna de la Laja se cartografió un deslizamiento traslacional de suelo, detectado en el evento 3. Este afectó un área de 7.052 m², en una ladera orientada hacia el oeste, en el valle del río Malalcura, río tributario del río Laja.

G022 Rincón Pichicoyahue

En G022 Rincón Pichicoyahue se cartografió un flujo de escombros, detectado en el evento 1, con un área afectada de 10.449 m² y una elevación máxima de 1.703 m s. n. m.

Figura 13. Distribución de remociones en masa según la grilla IGM en el área de estudio



Tipos de RM: (FE) flujo de escombros, (AE) avalanchas de escombros, (DT) deslizamientos traslacionales y (DI) deslizamientos indiferenciados. Elaboración propia

G031 Cordillera Tricauco

En G031 Cordillera Tricauco se cartografiaron en total 6 RM, detectadas en el evento 1; 2 deslizamientos traslacionales y 4 flujos de escombros. En total afectaron un área de 51.981 m².

G032 Queuco

En la zona G032 Queuco se cartografiaron 6 avalanchas de escombros, afectando un área total de 162.475 m²; 5 se detectaron en el evento 1 y 1 en el evento 3. El área afectada fue de 141.119 m² y 21.356 m², respectivamente. En la ubicación más oriental se registró la avalancha de escombros que alcanzó la máxima elevación entre las RM de este subtipo; 1.841 m s. n. m., esta se detectó en el evento 1 y afectó un área de 20.225 m².

G042 Biobío

En la zona G042 Biobío se cartografiaron en total 6 RM, detectadas en el evento 1, las que afectaron un área total de 40.670 m², 1 deslizamiento traslacional, 2 flujos de escombros y 3 avalanchas de escombros. Estas afectaron un área de 4.434 m², 14.963 m² y 21.273 m², respectivamente.

G054 Ranquil

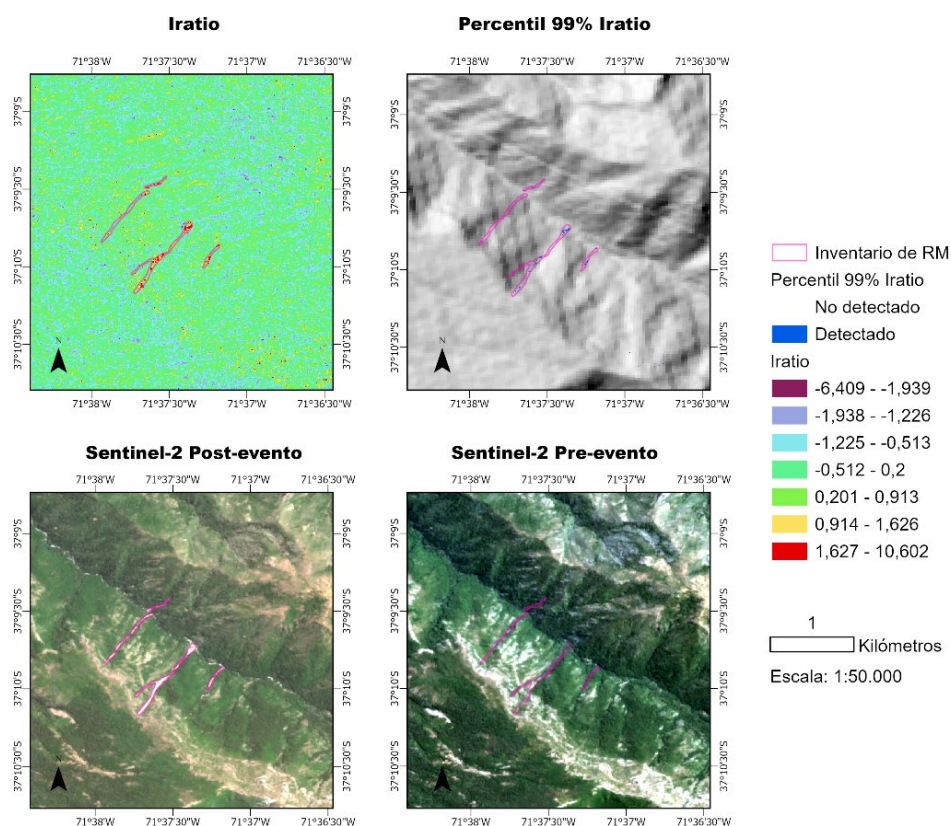
En la zona de G054 Ranquil se cartografiaron en total 4 RM, detectadas en el evento 1, las que afectaron un área total de 47.267 m², 2 deslizamientos traslacionales y 2 flujos de escombros. Estas afectaron un área de 16.350 m² y 30.917 m², respectivamente. En esta zona, en la ubicación más septentrional, se registró el deslizamiento traslacional con la elevación más alta entre las RM de este tipo en el área de estudio, 1.648 m s. n. m. con un área de afectación de 8.094 m².

4. DISCUSIÓN

4.1. Identificación de remociones en masa mediante SAR S1 en GEE

El enfoque de detección de RM a partir de cambios de retrodispersión con SAR S1 en GEE ha sido efectivo en el área de estudio, debido al tamaño de la superficie afectada por RM superiores a 1.000 m² y el predominio de cobertura boscosa, lo cual coincide con las sugerencias de Handwerger et al. (2022). Si bien la superficie boscosa ha sido clave, de todas maneras, se han detectado RM en superficies sin vegetación. Los valores positivos del Iratio logran captar el contraste que deja una huella fresca de RM del tipo deslizamiento y flujos, sobre todo cuando son áreas afectadas superiores a 1.000 m² (Figura 14).

Figura 14. Detección de remociones en masa mediante cambios de retrodispersión SAR S1 en un valle perpendicular al río Cholguán (Zona G009)



Elaboración propia

Se identificaron 4 eventos de lluvias intensas; 3 en el 2023 y 1 en el 2024. Estos se utilizaron como referencia para establecer las fechas previas y posteriores al evento de interés (EDI), en el código de GEE para la identificación de RM mediante cambios de intensidad de retrodispersión SAR con datos de S1. Solo se detectaron RM en el evento 1 y el evento 3. El 85 % del total de los registros se concentró en el evento 1.

La precipitación acumulada e intensidad promedio de las precipitaciones, registradas en la estación María Dolores, en ambos casos fue la menor (Figura 6).

La no detección de RM en los eventos 2 y 4 pueden responder a:

- 1) Limitaciones de la detección de RM con SAR; la cantidad de imágenes apiladas post evento necesarias para identificar RM y cambios significativos de cobertura de suelo en la misma estación.
- 2) La interacción de condiciones climáticas y meteorológicas en los eventos de lluvias intensas en el invierno de 2023 y 2024.

1. Limitaciones de la detección de remociones en masa con SAR; la cantidad de imágenes apiladas post evento necesarias para identificar RM y cambios significativos de cobertura de suelo en la misma estación.

La capacidad para detectar RM, a partir de mapas de cambio de retrodispersión SAR, mejora con la cantidad de imágenes apiladas posterior al evento de interés (EDI). Handwerger et al. (2022) han obtenido buenos resultados, el mejor de los casos, con un total de 133 imágenes post evento, en Hiroshima, Japón.

En este trabajo el período posterior al evento 1 abarcó 8 meses y se utilizaron 922 imágenes SAR post evento para la medición de cambios de retrodispersión. Esta relación en los eventos 2, 3 y 4 fue de 7 meses - 801 imágenes, 6 meses - 702 imágenes y 3 meses - 344 imágenes, respectivamente. En efecto, la cantidad de imágenes apiladas post eventos es bastante superior a los utilizadas en Japón. Si bien es cierto que la cantidad de imágenes post evento en el evento 4 es inferior que, en el resto de los eventos, esta es casi el triple de las imágenes post evento utilizadas en el mejor de los resultados en Hiroshima.

Handwerger et al. (2022) sugieren que todos los datos previos y posteriores al evento sean de la misma temporada en regiones donde la cobertura del suelo presenta cambios significativos entre estaciones. Sin embargo, el factor de la estacionalidad puede ser determinante cuando el objetivo de la aplicación del enfoque es una detección rápida RM, 1 o 2 semanas después del evento. En ese sentido, en este caso de estudio, hay que considerar que en invierno existen cambios significativos en la cobertura de nieve, la que suele aumentar en esta estación, por lo que una detección rápida de RM presenta dificultades. En el evento 4, prácticamente, la mayoría de las imágenes SAR post evento corresponden a la estación de invierno, por lo que la identificación de RM en este caso mejoraría con una mayor cantidad de imágenes adicionales, ya que esta adición suaviza la estacionalidad (Handewerger et al., 2022). Cuestión que, en este trabajo, para el evento 4, no fue posible debido a los plazos requeridos para cumplir con el programa en que se enmarca esta investigación. En este trabajo se comprueba que, a pesar de la variabilidad estacional del área de

estudio, se pudo identificar efectivamente las RM ocurridas en junio (evento 1) y agosto (evento 3), y que en julio (evento 2) no se registraron RM en el área. Por tanto, cuando el objetivo del enfoque es la elaboración de un inventario de RM, se concuerda, para este caso de estudio, que la utilización de la mayor cantidad de imágenes post evento resulta efectiva.

2. La interacción de condiciones climáticas y meteorológicas en los eventos de lluvias intensas en el invierno de 2023 y 2024 en la región del Biobío.

Una diferencia clave entre los inviernos de 2023 y 2024 radica en las condiciones de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés): mientras el primero se desarrolló bajo la influencia de El Niño, el segundo ocurrió en una fase neutral (NOAA, 2024). La variabilidad del ENSO influye en la frecuencia de los ríos atmosféricos (AR, por sus siglas en inglés) en la Cordillera de los Andes del sur. Durante episodios de La Niña, los AR tienden a ser menos frecuentes en esta región (Saavedra et al., 2020). Por el contrario, en eventos de El Niño, los AR aumentan en frecuencia, duración y contenido de humedad, especialmente en la zona central de Chile, intensificando las precipitaciones (Campos & Rondanelli, 2023).

Los AR se definen como corredores largos, estrechos y transitorios que transportan de manera intensa vapor de agua en dirección horizontal (Ralph et al., 2018). Según Garreaud (2024), las tormentas de junio y agosto de 2023 ocurrieron en un ambiente cálido y estuvieron asociadas a ríos atmosféricos zonales (ZAR), una variante de los AR que avanza siguiendo una latitud fija. En la zona central de Chile, los ZAR impactan de forma perpendicular a la Cordillera de los Andes, concentrando la mayor parte de las precipitaciones en esta región.

El ZAR de junio de 2023 alcanzó la categoría 4 en la escala propuesta por Ralph et al. (2019), que clasifica los AR según su intensidad, basada en el transporte integrado de vapor de agua (IVT, por sus siglas en inglés) (Garreaud R., 2024). En la precordillera de la zona central, se registraron precipitaciones líquidas acumuladas de hasta 700 mm en cinco días, asociadas a un período de retorno de 30 a 40 años. Durante este evento, la isoterma de 0 °C estuvo cercana a los 3.300 m s. n. m. En la región del Biobío se reportó derretimiento de nieve, debido a las condiciones cálidas y eventos de lluvias sobre nieve (ROS) (Garreaud R., 2023a). Los eventos ROS pueden desencadenar inundaciones y RM (McCabe et al., 2007; Ocampo & Meza, 2020; Pall et al., 2019).

El ZAR ocurrido el 19 de agosto de 2023 presentó un contenido de vapor de agua levemente inferior al registrado en junio, alcanzando la categoría 3. Durante este evento, la isoterma de 0 °C se ubicó en torno a los 2.500 m s. n. m. (Garreaud, 2023b).

El mes de julio de 2023, a pesar de las precipitaciones registradas en la estación de María Dolores, se ha considerado como un mes seco (Garreaud R., 2023b).

En junio de 2024, las intensas lluvias fueron atribuibles a un río atmosférico inclinado (TAR, por sus siglas en inglés), un fenómeno frecuente durante el invierno en Chile central, según Garreaud (2024). En este tipo de evento, el flujo de humedad proviene del noroeste, formando un ángulo de 45° con la Cordillera de los Andes, lo que concentra las precipitaciones principalmente en la cordillera de la costa. En este contexto, la zona costera de la región del Biobío fue la más afectada, con una

acumulación de 394 mm en Concepción. Este río atmosférico alcanzó la categoría 4, y la acumulación de nieve se registró por encima de los 2.000 m s. n. m. (Garreaud, 2024).

Los antecedentes presentados en los reportes citados son coherentes con los resultados obtenidos en la detección de RM en el área de estudio. Aunque los datos de lluvias en los eventos 2 y 4 son mayores, la distribución espacial de estas precipitaciones no resultó relevante en la Cordillera de los Andes.

En esta propuesta metodológica la ocurrencia RM se ha inferido a partir de eventos de lluvias intensas, utilizando datos de precipitación de la estación más cercana al área de estudio en lugar de registros directos de RM. Es importante señalar como una limitación que, ante la ausencia de estaciones meteorológicas en la Cordillera de los Andes, habría sido pertinente realizar un análisis de la distribución espacial de las precipitaciones tras identificar los eventos de lluvias. Sin embargo, la utilización de datos grillados como CHIRPS requiere información complementaria, como la altitud de la isoterma de 0 °C durante los días de lluvia, para diferenciar entre precipitación líquida y sólida (Funk et al., 2014). Debido a las restricciones de tiempo de este trabajo, se optó por descartar esta alternativa.

4.2. Tipologías y características de remociones en masa identificadas

Los flujos de escombros fueron el tipo de RM más común identificado, seguido de las avalanchas de escombros, los deslizamientos fueron un poco más de 1/5 parte del total. El enfoque de detección de RM utilizado es efectivo para identificar estas tipologías (Handwerger et al., 2022).

Las tipologías de RM identificadas son características de regiones montañosas y están principalmente inducidas por lluvias extremas, lo que las vincula con frecuencia a eventos de inundación (Hung et al., 2014).

Las avalanchas de escombros pueden iniciar como deslizamientos de escombros, y los flujos de escombros como ambos tipos (Hung et al., 2014). La RM con el área afectada más grande identificada en el área de estudio correspondió a un flujo de escombros que inició, claramente, como una avalancha de escombros en G010 Puntilla Chillán.

La diferencia entre un flujo de escombros con una avalancha de escombros es que el primero se produce periódicamente en canales de drenaje y el segundo no está ligado a una trayectoria establecida; se puede encontrar en cualquier lugar de una pendiente empinada (Hung et al., 2014).

Las avalanchas de escombros inician como deslizamientos de suelo. Una particularidad que los distingue es que las huellas que dejan se ensanchan pendiente abajo, ya que la carga no drenada desestabiliza un ancho cada vez mayor del segmento de pendiente (Hung et al., 2014) (Figura 15). En la zona G032 Queuco, la segunda zona más afectada por RM (162.475 m²), se identificaron únicamente este tipo de RM.

Figura 15. Avalanchas de escombros ocurridas en el evento 1 en la zona G032 inventariadas



Fuente: Imagen obtenida de Google Earth (26 de enero de 2024) y adaptada para este estudio.
Elaboración propia

Los deslizamientos de suelo, flujos y avalanchas de escombros están entre los tipos más comunes de RM que forman represas (Schuster & Costa, 1986). Las represas de RM son comunes en todas las regiones montañosas del mundo, los Alpes, los Apeninos, Sicilia, Asia central, Turquía, el Himalaya, Nueva Zelanda, China, Japón, la cordillera norteamericana, América central, el Caribe y los Andes (Evans et al., 2011).

Las rupturas de estas presas pueden generar inundaciones destructivas (Evans et al., 2011). En el área de estudio existen varios lugares habitados en los valles andinos, por lo que resulta necesario evaluar la exposición de estos a este tipo de peligros.

Los tipos de RM con mayor área promedio de afectación son los flujos de escombros, 15.039 m², y las avalanchas de escombros, 11.880 m². En contraste, los deslizamientos traslacionales presentan un promedio de 5.707 m², mientras que los deslizamientos indiferenciados alcanzan solo 4.528 m².

La totalidad de RM inducidas por lluvias cartografiadas están por debajo de la isoterma 0 °C aproximada para el área de estudio en la temporada de invierno; ~2.000 m s. n. m (Mardones & Garreaud, 2020; Vásquez, 2020). La máxima elevación de las RM alcanzó los 1.858 m s. n. m., correspondiente a un flujo de escombros en la zona G009 Colonia de Santa Lucía, en una ladera afectada por procesos periglaciares. De acuerdo con el inventario, las avalanchas de escombros suelen ocurrir en ~1.700 m s. n. m.; mientras que los flujos de escombros, ~1.200 m s. n. m.; los deslizamientos indiferenciados, ~1.200 m s. n. m., y los deslizamientos traslacionales, ~1.100 m s. n. m.

4.3. Distribución de áreas afectadas por remociones en masa de acuerdo con la grilla del IGM

La zona noroeste del área de estudio, correspondiente a G009 Colonia de Santa Lucía, fue la más afectada por RM en los eventos 1 y 3. El área afectada en esta zona fue de 268.957 m², 34 % del total de las RM inventariadas en el área de estudio. Esto coincide con los informes de Garreaud R. (2023a, 2023b, 2024), que destacan que las tormentas de 2023 en el centro de Chile afectaron principalmente la Cordillera de los Andes, entre las regiones de Maule y Ñuble, al norte del área de estudio (Garreaud R., 2024).

4.4. Remociones en masa dependientes de la trayectoria

No se identificaron RM en 2024, lo que impide establecer la existencia de RM dependientes de la trayectoria. Según Roberts et al. (2021), este tipo de dependencia puede evaluarse mediante análisis de al menos cinco años, con cortes bianuales. En esta investigación, se intentó observar RM dependientes de la trayectoria durante dos años consecutivos (2023 y 2024), además de elaborar un inventario que abarcara dicho período.

Los resultados sugieren que la ocurrencia de RM en el área de estudio, con las características observadas, está influenciada por la condición del ENSO. Por tanto, para identificar RM dependientes de la trayectoria, sería necesario contar con un inventario más extenso de RM inducidas por lluvias, idealmente abarcando un período de al menos diez años.

Se propone completar el inventario existente incorporando eventos de lluvias intensas de años anteriores y explorando enfoques complementarios al utilizado en este estudio. Por ejemplo, Serey et al. (2019) cartografiaron 1.226 RM desencadenadas por el terremoto de 2010, entre las latitudes 32,5° S y 38,5° S del territorio chileno, con superficies que varían entre 1.000 y 250.000 m², mediante la interpretación visual de imágenes Landsat.

4.5. Características y calidad del inventario elaborado

La calidad de un inventario, según Guzzetti et al. (2012), depende de su exactitud, el tipo de información representada y la certeza de los datos mostrados en el mapa. En este trabajo se ha elaborado un inventario con las siguientes características generales:

1. **Compleitud:** Completo para RM con superficies mayores a 1.000 m².
2. **Precisión temporal:** Las fechas de ocurrencia de las RM están definidas según la duración de los eventos de lluvias intensas, expresada en días. Por ejemplo, los eventos 1 y 3 abarcan 5 y 6 días, respectivamente.

3. **Clasificación de los tipos de remociones en masa:** Los tipos y subtipos que no pudieron ser identificados con claridad se clasificaron como deslizamientos indiferenciados, lo que incluye dos RM en esta categoría.

En relación con la precisión de las fechas de ocurrencia de las RM, esta podría mejorar si se reduce el intervalo de días considerado para los eventos. Sin embargo, esta precisión también depende de la disponibilidad y calidad de los datos obtenidos mediante el sensor Sentinel-1 (S1). A pesar de estas limitaciones, el presente inventario representa un avance significativo, ya que contar con fechas precisas ha sido un desafío en análisis estadísticos previos de RM (por ejemplo, Fang et al., 2023; Maragaño-Carmona et al., 2023; Morales et al., 2022).

En publicaciones sobre susceptibilidad, es común encontrar inventarios en los que no se identifican los tipos de RM o en los que existen inconsistencias en dicha identificación, como el uso indistinto de los términos "flujos de escombros" y "avalanchas de escombros". Este inventario, por el contrario, clasifica claramente estas tipologías según los criterios de Hungr et al. (2014), lo que supone un avance destacable en términos de calidad. Esta diferenciación es crucial, ya que la extensión de las áreas afectadas y las medidas de mitigación necesarias varían según el tipo de RM (Reichenbach et al., 2018).

En cuanto al tipo de inventario, los inventarios de eventos son ampliamente utilizados para el modelado de susceptibilidad junto con los geomorfológicos que muestran la distribución y abundancia general de las RM (Reichenbach et al., 2018). Según este autor, los inventarios de eventos son más adecuados para evaluar el rendimiento predictivo de los modelos que para su elaboración, ya que la distribución de los RM no solo depende de las condiciones del terreno, sino también de la ubicación, extensión y magnitud del desencadenante.

Aunque el inventario elaborado cubre dos eventos de lluvias extremas ocurridos durante el invierno de 2023, pudiendo considerarse un inventario estacional, se recomienda ampliarlo con nuevos datos. Esto permitirá abarcar múltiples años y garantizar su utilidad para el modelado de susceptibilidad, siguiendo las recomendaciones de Reichenbach et al. (2018).

4.5.1. Validación en terreno del inventario

En cuanto a la validación en terreno, se verificaron únicamente cuatro remociones en masa (RM), lo que representa un 7 % del total del inventario. Este bajo nivel de validación no compromete la confiabilidad general del estudio ni implica que la interpretación de las RM mediante imágenes satelitales sea imprecisa. Según Guzzetti et al. (2012):

1. Es erróneo suponer que el mapeo en terreno es siempre más preciso que el mapeo remoto de RM. En áreas montañosas o con vegetación densa, el mapeo en terreno resulta especialmente complejo. Su principal utilidad radica en proporcionar información general y específica sobre el tipo y las características de las RM para mejorar la interpretación remota.

2. Los RM dejan señales discernibles que pueden ser identificadas y clasificadas mediante imágenes satelitales. Estos signos, de carácter morfológico, dependen del tipo de RM y de la velocidad del movimiento.
3. No existe una especificación estándar sobre cómo obtener y validar un mapa de RM (Guzzetti et al., 2012; Yong et al., 2022).

Por otro lado, según Reichenbach et al. (2018), la mayoría de los inventarios utilizados para modelar la susceptibilidad de RM se elaboran a partir de la interpretación de fotografías aéreas e imágenes satelitales.

Finalmente, es importante señalar que realizar una validación en terreno en áreas remotas implica costos significativos en términos de tiempo y recursos. Las distancias involucradas y la logística necesaria, que incluye disponer de diversas alternativas de transporte, dificultan una validación exhaustiva.

4.6. Desafíos futuros respecto del enfoque utilizado y el área de estudio

El objetivo de este trabajo difiere de otros estudios que han aplicado un enfoque basado en el análisis de cambios de retrodispersión SAR en Google Earth Engine (GEE) para la detección de remociones en masa (RM). Mientras que los trabajos anteriores se han centrado en perfeccionar la detección de RM, evaluando sus resultados mediante métricas de rendimiento o evaluaciones cualitativas con inventarios de RM (Handwerger et al., 2020; Handwerger et al., 2022; Lindsay et al., 2022; Nugroho et al., 2021; Peters et al., 2024), este trabajo se enfoca en la elaboración de un inventario de RM inducidas por lluvias, caracterizando y conociendo su distribución en un área sin registros previos de este tipo de eventos. En este caso, la ocurrencia de RM se dedujo a partir de eventos recientes de lluvias intensas.

El enfoque adoptado permitió focalizar la observación en áreas específicas con valores elevados de Iratio, facilitando el reconocimiento y la cartografía de RM en una extensa región.

Los resultados de este trabajo representan un avance significativo, estableciendo el área de estudio como un sitio de prueba para perfeccionar la detección de remociones en masa (RM) mediante enfoques basados en cambios de retrodispersión SAR en Google Earth Engine (GEE). Esto permitirá evaluar diversas estrategias en un territorio geomorfológicamente diverso, en comparación con los lugares donde este enfoque ya ha sido aplicado.

La diversidad del área de estudio está determinada por factores como la localización, el clima, la elevación y el contexto geomorfológico regional, que influyen en la densidad de la cobertura vegetal. La densidad de la cobertura boscosa ha sido clave para definir la polarización más adecuada al analizar cambios en la retrodispersión SAR para la detección de RM (Handwerger et al., 2020; Handwerger et al., 2022; Lindsay et al., 2022; Nugroho et al., 2021; Peters et al., 2024).

El área de estudio está dominada por las cumbres de cuatro complejos volcánicos cubiertos por glaciares, con elevaciones que varían entre ~3.000 y 3.500 m s. n. m. Durante la estación húmeda, la isoterma de 0 °C se encuentra en torno a los ~2.000 m s. n. m., lo que implica que las precipitaciones por encima de este nivel son en forma de nieve. La cobertura de nieve ejerce un efecto estabilizador en las laderas, impidiendo la ocurrencia de RM inducidas por lluvias a esas altitudes.

Además, los valles glaciares, formados durante las glaciaciones del Pleistoceno, están cubiertos por depósitos piroclásticos asociados a la actividad volcánica del Cuaternario (Thiele et al., 1998). Por ejemplo, en Hokkaido, las RM ocurrieron en depósitos piroclásticos entre 100 y 250 m s. n. m. (Peters et al., 2024). Esta interacción entre la actividad volcánica y los procesos glaciares, característica del área de estudio, junto con los procesos fluviales, ha dado lugar a laderas fluviales formadas por depósitos de lahares. Estos depósitos, compuestos por materiales mal seleccionados, por sus características son proclives a RM.

Los cordones graníticos bajo ~ 1.800 m s. n. m. suelen estar cubiertos por suelo residual y densos bosques, condiciones similares a lo observado en Hiroshima, área de prueba en más de un estudio que ha utilizado el enfoque de retrodispersión SAR (Handwerger et al., 2022). Por encima de este nivel, se observan relieves glaciares y periglaciares con vegetación escasa, depósitos de canchales o campos de derrubios producto de la gelifracción, los cuales pueden dar origen a flujos de escombros tras una RM.

Los estudios previos se han concentrado en zonas de clima tropical, subtropical y templado, caracterizadas por una densa cobertura boscosa (Handwerger et al., 2020; Handwerger et al., 2022; Nugroho et al., 2021). Sin embargo, Lindsay et al. (2022) trabajaron en un área de relieves glaciares con cobertura vegetal más variada, encontrando señales más fuertes con polarización VV debido a la rugosidad superficial y el tipo de vegetación, más que a la densidad del bosque.

En este trabajo, se utilizó la polarización VH, detectando valores de I_{ratio} positivos que permitieron identificar RM en áreas con escasa vegetación y suelo expuesto. Estos cambios se asocian a alteraciones en la rugosidad superficial después de una RM, visibles como cambios en la reflectancia en imágenes de Sentinel-2. Probar la eficacia de la polarización VV no fue un objetivo planteado, pero representa una interrogante interesante ahora que se cuenta con un inventario en esta área de estudio.

En cuanto a las represas formadas por RM, es necesario elaborar inventarios más detallados para comprender mejor estos procesos. Por ejemplo, se ha observado que el desagüe de la laguna Canicu, ubicada a 10 km al noreste de la localidad homónima, está bloqueado por un depósito de RM con un escarpe visible (~18 hectáreas). Sin embargo, se desconoce la fecha y el factor desencadenante de este evento, dejando una oportunidad para futuras investigaciones.

5. CONCLUSIÓN

Se diseñó e implementó una metodología que permitió caracterizar RM inducidas por lluvia y analizar su distribución en la Cordillera de los Andes de la región del Biobío, para los eventos meteorológicos extremos ocurridos en junio y agosto de 2023, mediante la detección de RM a partir de cambios de intensidad de retrodispersión SAR S1 en GEE, la elaboración de un inventario y análisis de datos. La elaboración del inventario incluyó la validación de RM con imágenes satelitales y trabajo de campo.

El inventario, completo para RM con superficies mayores a 1.000 m², identificó como los tipos más comunes los flujos de escombros y las avalanchas de escombros, tipologías características de regiones montañosas y asociadas a la formación de represas naturales que pueden desencadenar inundaciones catastróficas. Estos hallazgos son relevantes para la modelación de susceptibilidad y la evaluación de medidas de mitigación, debido a su morfología y la extensión que pueden alcanzar.

El enfoque adoptado permitió focalizar la observación en áreas específicas con altos valores de Iratio, facilitando la identificación de RM en un entorno geomorfológicamente diverso. La polarización VH demostró ser efectiva en áreas de vegetación dispersa y suelo descubierto, atribuyéndose esto a los cambios en la rugosidad superficial tras una RM. Además, se comprobó que el uso de imágenes adicionales posteriores al evento puede suavizar la variabilidad estacional, como el efecto de la nieve en invierno, permitiendo identificar con precisión las RM ocurridas en 2023.

La identificación de remociones en masa (RM) durante los eventos de junio y agosto de 2023 coincidió con la fase cálida del ENSO (El Niño) y precipitaciones intensas en un ambiente cálido, asociadas a ríos atmosféricos zonales (ZAR) que afectan particularmente a la región andina. Esto permite inferir que la ocurrencia de RM con las características observadas en el área de estudio está ligada a fenómenos climáticos interanuales y a eventos meteorológicos extremos de gran escala.

No se identificaron RM en 2024, lo que impide establecer la existencia de RM dependientes de la trayectoria, por lo que se rechaza la hipótesis. La no ocurrencia de RM en el área de estudio en el evento de precipitación extrema de junio de 2024, es coherente con el patrón espacial de las precipitaciones que afectaron mayormente a la zona costera de la región del Biobío.

La dependencia de la trayectoria describe el efecto heredado entre RM antiguas y posteriores, donde las primeras actúan como iniciadoras de las segundas durante cierto período. Se puede observar en cortes de dos años evaluando casos en los que los polígonos de RM posteriores están total o parcialmente contenidos dentro de los polígonos de RM precedentes, o cuando estos comparten bordes o puntos de contacto. Debido a que la ocurrencia de RM en el área de estudio parece estar relacionadas a la condición de El Niño, para evaluar adecuadamente la dependencia de la trayectoria, será necesario desarrollar un inventario que abarque al menos una década.

En esta propuesta metodológica la ocurrencia RM se ha inferido a partir de eventos de lluvias intensas, utilizando datos de precipitación de la estación más cercana al área de estudio en lugar de registros directos de RM, ya que no existían, por lo que, ante la ausencia de estaciones meteorológicas en la Cordillera de los Andes, se sugiere utilizar datos grillados para analizar la

distribución espacial y temporal de la precipitación líquida antes de establecer las fechas del evento de interés.

En un inventario de RM basado en eventos, la ocurrencia de las remociones en masa está determinada principalmente por la ubicación, la extensión y la magnitud del desencadenante, más que por las condiciones inherentes del terreno. Por lo tanto, su aplicabilidad en la evaluación de la susceptibilidad es más adecuada para analizar el rendimiento predictivo de los modelos. Para avanzar en la modelación de susceptibilidad, se recomienda completar el inventario con datos multianuales, lo que permitirá una mejor representación de las condiciones y patrones asociados a estos fenómenos.

La validación en terreno de las remociones en masa (RM) abarcó solo el 7 % del inventario, lo que no compromete la confiabilidad general del estudio ni sugiere que la interpretación de las RM a partir de imágenes satelitales sea imprecisa. Sin embargo, el trabajo en terreno resultó fundamental para comprender mejor el entorno geomorfológico y afinar la interpretación visual en las imágenes satelitales. Dado que realizar validaciones en áreas remotas conlleva costos significativos en términos de tiempo y recursos, se recomienda considerar estas limitaciones logísticas en la planificación de futuras investigaciones.

Este trabajo pone a disposición un inventario de RM, a partir del cual se podrán probar distintas estrategias para mejorar la detección de RM con el enfoque de cambios de intensidad de retrodispersión SAR S1 en GEE, como, por ejemplo, probar la eficacia de la polarización VH y VV en un área geomorfológicamente diversa y con una cobertura vegetal variable.

La utilización del inventario y un análisis adicional de la distribución espacial y temporal de la precipitación líquida puede contribuir a identificar eventos de lluvia sobre nieve, así como establecer umbrales a partir del cual ocurren RM en el área de estudio.

La dependencia de la trayectoria, observable mediante el inventario, requerirá su ampliación con datos de años anteriores. Para ello, se recomienda utilizar enfoques complementarios, como la interpretación visual de imágenes ópticas Landsat, pese a que esta metodología podría implicar menor precisión en la determinación de las fechas de ocurrencia de RM. Como alternativa, se plantea la construcción de inventarios estacionales que abarquen distintos años.

Hasta la fecha, no existe un inventario de remociones en masa (RM) inducidas por lluvias en el área de estudio, por lo que este trabajo constituye un esfuerzo precursor en la materia. Los tipos de RM inventariados, como flujos y avalanchas de escombros, representan un riesgo significativo, ya que pueden generar represas en cabeceras de valles, causar inundaciones y afectar a comunidades río abajo. En futuras investigaciones, será esencial realizar un inventario detallado de las represas generadas por RM, tanto aquellas que han originado cuerpos de agua como las que han obstruido el desagüe de estas lagunas. Esto permitirá profundizar en el conocimiento de estos procesos en el área de estudio y su relación con las RM inducidas por lluvia.

En el contexto de los escenarios de cambio climático, que proyectan un aumento en la frecuencia de lluvias intensas y eventos asociados como RM e inundaciones, es fundamental seguir actualizando este inventario. Esto permitirá desarrollar mapas de susceptibilidad, peligro y riesgo, herramientas clave para la gestión y planificación territorial en el ámbito del riesgo.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Abad, L., Hölbling, D., Albrecht, F., Dias, H. C., Dabiri, Z., Reischenböck, G., & Tešić, D. (2022). Mass movement susceptibility assessment of alpine infrastructure in the Salzkammergut area, Austria. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 76. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.103009>
- Abele, G. (1984). Derrumbes de montaña y morrenas en los Andes chilenos. *Revista de Geografía Norte Grande*, 11, 17-30.
- Agouborde, M. V., & Dote, S. (23 de Agosto de 2023). *El País*. Obtenido de Cuatro días de temporal en Chile: las lluvias no dan tregua y la emergencia llega a Santiago: https://elpais.com/chile/2023-08-23/cuatro-dias-de-temporal-en-chile-las-lluvias-no-dan-tregua-y-la-emergencia-llega-a-santiago.html?event=go&event_log=go&prod=REGCRARTCHILE&o=cerradochile
- Barria, I., Carrasco, J., Casassa, G., & Barria, P. (2019). Simulation of Long-Term Changes of the Equilibrium Line Altitude in the Central Chilean Andes Mountains Derived From Atmospheric Variables During the 1958–2018 Period. *Front. Environ. Sci.*, 7. doi:<https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00161>
- BCN. (8 de Noviembre de 2024). *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile*. Obtenido de Mapas vectoriales: https://www.bcn.cl/siit/mapas_vectoriales/index_html
- Börgel, R. (1965). *Mapa geomorfológico de Chile. Descripción geomorfológica del territorio*. Santiago: Universidad de Chile, Facultad de Filosofía y Educación, Instituto de Geografía, Sección Aplicada.
- Campos, D., & Rondanelli, R. (2023). ENSO-Related Precipitation Variability in Central Chile: The Role of Large Scale Moisture Transport. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. doi:<https://doi.org/10.1029/2023JD038671>
- Cruden, D. M. (1991). A simple definition of landslides. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 43, págs. 27-29. Paris.
- Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). Landslide types and procesos. En A. K. Turner, & R. L. Schuster, *Landslides: Investigation and Mitigation. Special Report 247* (págs. 36-75). Washington: National Academy Press.
- DGA. (2022). *Inventario Público de Glaciares, actualización 2022*. Obtenido de Dirección General de Aguas: <https://dga.mop.gob.cl/Paginas/InventarioGlaciares.aspx>
- Evans, S. G., Delaney, K. B., Strom, A., & Scarascia-Mugnozza, G. (2011). The Formation and Behaviour of Natural and Artificial Rockslide Dams; Implications for Engineering Performance and Hazard Management. En S. Evans, R. Hermanns, A. Strom, & G. Scarascia-Mugnozza (Edits.), *Natural and Artificial Rockslide Dams* (Vol. 133, págs. 1-75). Heidelberg, Berlín: Springer. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-642-04764-0_1

- Fang, Z., Wang, Y., Van Westen, C. J., & Lombardo, L. (2023). Space–Time Landslide Susceptibility Modeling Based on Data-Driven Methods. *Mathematical Geosciences*. doi:10.1007/s11004-023-10105-6
- FCFM. (9 de Agosto de 2023). *Operación Riñihue: Los héroes de ayer y hoy*. (U. d. Chile, Editor) Obtenido de <https://ingenieria.uchile.cl/noticias/207882/operacion-rinihue-los-heroes-de-ayer-y-hoy>
- Funk, C. C., Peterson, P. J., Landsfeld, M. F., Pedreros, D. H., Verdin, J. P., Rowland, J. D., . . . Verdin, A. P. (2014). A quasi-global precipitation time series for drought monitoring: U.S. Geological Survey Data. doi:<https://dx.doi.org/10.3133/ds832>.
- Fustos, I., Abarca-del-Rio, R., Moreno-Yaeger, R., & Somos-Valenzuela, M. (2020). Rainfall-Induced Landslides forecast using local precipitation and global climate indexes. *Natural Hazards*, 102, 115-131. doi:<https://doi.org/10.1007/s11069-020-03913-0>
- Fustos, I., Remy, D., Abarca-Del-Rio, R., & Muñoz, A. (2017). Slow movements observed with in situ and remote-sensing techniques in the central zone of Chile. *International Journal of Remote Sensing*, 38(24), 7514-7530. doi:<https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1317944>
- García-Davalillo, J. C., Herrera, G., Notti, D., Strozzi, T., & Álvarez-Fernández, I. (2014). DInSAR analysis of ALOS PALSAR images for the assessment of very slow landslides: the Tena Valley case study. *Landslide*, 11, 225-246. doi:<https://doi.org/10.1007/s10346-012-0379-8>
- Garreaud, R. (27 de Junio de 2023a). (CR)2. Obtenido de Análisis (CR)2 | Vuelven los gigantes: un análisis preliminar de la tormenta ocurrida entre el 21 y 26 de junio de 2023 en Chile central: <https://www.cr2.cl/analisis-cr2-vuelven-los-gigantes-un-analisis-preliminar-de-la-tormenta-ocurrida-entre-el-21-y-26-de-junio-de-2023-en-chile-central/>
- Garreaud, R. (2023b). *Análisis CR2 | Vuelve Aculeo... ¿se va la Megasequía?* Obtenido de <https://www.cr2.cl/analisis-cr2-vuelve-aculeo-se-va-la-megasequia/>
- Garreaud, R. (Octubre de 2024). *Análisis CR2 | Junio versus junio*. Obtenido de Departamento de Geofísica Universidad de Chile: <https://uchile.cl/ig219071>
- Guzzetti, F., Malamud, B. D., Turcotte, D., & Reichenbach, P. (2002). Power-law correlations of landslide areas in central Italy. *Earth and Planetary Science Letters*, 195, 169-183. doi:[https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(01\)00589-1](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00589-1)
- Guzzetti, F., Mondini, A. C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., & Chang, K.-T. (2012). Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Reviews*, 112, 42-66. doi:<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.02.001>
- Haefele, V., Olivares, H., Contreras, C., Herrera, N., & Flores, C. (2003). *Riñihuazo, memorias de un desastre*. (C. Katherine, & J. Muñoz, Edits.) Valdivia.
- Handwerger, A. L., Huang, M. -H., Jones, S. Y., Amatya, P., Kerner, H. R., & Kirschbaum, D. B. (2022). Generating landslide density heatmaps for rapid detection using open-access satellite radar data in Google Earth Engine. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 22, 753–773. doi:<https://doi.org/10.5194/nhess-22-753-2022>

- Handwerger, A. L., Jones, S. Y., Huang, M. H., Amatya, P., Kerner, H. R., & Kirschbaum, D. B. (2020). Rapid landslide identification using synthetic aperture radar amplitude change detection on the Google Earth Engine. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.*
doi:<https://doi.org/10.5194/nhess-2020-315>
- Hauser, A. (2000). *Remociones en masa en Chile*. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Huggett, R. (2017). *Fundamentals of geomorphology* (Fourth ed.). New York: Routledge.
- Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslide*, 11, 167-194. doi:<https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>
- Ilabaca, P. (1980). Las condiciones naturales del sitio de Concepción Metropolitano. *Revista Geográfica*, 141-151. Obtenido de <https://www.jstor.org/stable/40992381>
- IPCC. (20 de Marzo de 2023). *press-release-ar6-synthesis-report*. Obtenido de <https://www.ipcc.ch/2023/03/20/press-release-ar6-synthesis-report/>
- Jet Propulsion Laboratory. (n.d.). *Synthetic Aperture Radar (SAR) imaging basics*. (NASA, Ed.) Recuperado el 27 de Diciembre de 2024, de https://descanso.jpl.nasa.gov/SciTechBook/series2/02Chap1_110106_amf.pdf
- Jung, J., & Yung, S. H. (2020). Evaluation of Coherent and Incoherent Landslide Detection Methods Based on Synthetic Aperture Radar for Rapid Response: A Case Study for the 2018 Hokkaido Landslides. *Remote Sensing*, 12(2). doi:<https://doi.org/10.3390/rs12020265>
- Lindsay, E., Frauenfelder, R., Rüther, D., Nava, L., Rubensdotter, L., Strout, J., & Nordal, S. (2022). Multi-Temporal Satellite Image Composites in Google Earth Engine for Improved Landslide Visibility: A Case Study of a Glacial Landscape. *Remote Sensing*, 14(10). doi:<https://doi.org/10.3390/rs14102301>
- López, P. (2015). Análisis de umbrales de precipitación de procesos de remoción en masa, en las eras urbanizadas de la costa de Chile centro-sur. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 24(2), 93-112. doi:10.15446/rcdg.v24n2.50212
- López, P., Qüense, J., Henríquez, C., & Martínez, C. (2021). Applicability of spatial prediction models for landslide susceptibility in land-use zoning instruments: a guideline in a coastal settlement in South-Central Chile. *Geocarto International*, 37(22), 6474-6493. doi:10.1080/10106049.2021.1939440
- Maragaño-Carmona, G., Fustos Toribio, I. J., Descote, P.-Y., Robledo, L. F., Villalobos, D., & Gatica, G. (2023). Rainfall-Induced Landslide Assessment under Different Precipitation Thresholds Using Remote Sensing Data: A Central Andes Case. *Water*, 15(14). doi:<https://doi.org/10.3390/w15142514>
- Mardones, M., & Brito, M. (1978). *El sitio geomorfológico de las ciudades de Concepción y Talcahuano*. Concepción: Universidad de Concepción, Departamento de Geografía. Obtenido de <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/15943>

- Mardones, M., & Rojas, J. (2012). Procesos de remoción en masa inducidos por el terremoto del 27F de 2010 en la franja costera de la Región del Biobío, Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 57-74.
- Mardones, M., & Vidal, C. (2001). La zonificación y evaluación de los riesgos naturales de tipo geomorfológico: un instrumento para la planificación urbana en la ciudad de Concepción. *EURE*, 27(81), 97-122. doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0250-71612001008100006>
- Mardones, M., Echeverría C., F., & Jara B., C. (2004). Una contribución al estudio de los desastres naturales en Chile Centro Sur: efectos ambientales de las precipitaciones del 26 de junio del 2005 en el área Metropolitana de Concepción. *Investigaciones Geográficas*(38), 1-24. doi:<https://doi.org/10.5354/0719-5370.2004.27748>
- Mardones, P., & Garreaud, R. D. (2020). Future Changes in the Free Tropospheric Freezing Level and Rain-Snow Limit: The Case of Central Chile. *Atmosphere*, 11(11), 1259. doi:<https://doi.org/10.3390/atmos11111259>
- McCabe, G. J., Clark, M. P., & Hay, L. E. (2007). Rain-on-Snow Events in the Western United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88(3), 319-328. doi:<https://doi.org/10.1175/BAMS-88-3-319>
- Morales, B., Garcia-Pedrero, A., Lizama, E., Lillo-Saavedra, M., Gonzalo-Martín, C., Chen, N., & Somos-Valenzuela, M. (2022). Patagonian Andes Landslides Inventory: The Deep Learning's Way to Their Automatic Detection. *Remote Sensing*, 14(18), 4622. doi:<https://doi.org/10.3390/rs14184622>
- Muller, O. H. (2022). El Niño-Southern Oscillation (ENSO). *Salem Press Encyclopedia of Science*. Obtenido de <https://research.ebsco.com/linkprocessor/plink?id=d2494243-a3c5-3f57-a5f1-340e5285385d>
- National Aeronautics and Space Administration. (2017). *ARSET - Introduction to Synthetic Aperture Radar. Appliedsciences*. Obtenido de <https://appliedsciences.nasa.gov/get-involved/training/english/arset-introduction-synthetic-aperture-radar>
- NOAA. (24 de Julio de 2024). *Cold & Warm Episodes by Season*. Obtenido de https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php
- Nugroho, F. S., Danoedoro, P., Arjasakusuma, S., Candra, D. S., Bayanuddin, A. A., & Samodra, G. (2021). Assessment of Sentinel-1 and Sentinel-2 Data for Landslides Identification using Google Earth Engine,. *2021 7th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR)*, (págs. 1-6). Bali. doi:10.1109/APSAR52370.2021.9688356
- Ocampo Melgar, D., & Meza, F. J. (2020). Exploring the Fingerprints of Past Rain-on-Snow Events in a Central Andean Mountain Range Basin Using Satellite Imagery. *Remote Sensing*, 12(24), 4173. doi:<https://doi.org/10.3390/rs12244173>
- Pall, P., Tallaksen, L. M., & Stordal, F. (2019). A Climatology of Rain-on-Snow Events for Norway. *Journal of Climate*, 32(20), 6995-7016. doi:<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0529.1>

- Pei, Y., Qiu, H., Zhu, Y., Wang, J., Yang, D., Tang, B., . . . Cao, M. (2023). Elevation dependence of landslide activity induced by climate change in the eastern Pamirs. *Landslides*, *20*, 1115–1133. doi:<https://doi.org/10.1007/s10346-023-02030-w>
- Peters, S., Liu, J., Keppel, G., Wendleder, A., & Xu, P. (2024). Detecting Coseismic Landslides in GEE Using Machine Learning Algorithms on Combined Optical and Radar Imagery. *Remote Sensing*, *16*. doi: <https://doi.org/10.3390/rs16101722>
- Phillips, J. D. (2006). Evolutionary geomorphology: thresholds and nonlinearity in landform response to environmental change. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, *10*, 731–742. doi:<https://doi.org/10.5194/hess-10-731-2006>
- Rabus, B., Eineder, M., Roth, A., & Bamler, R. (2003). The shuttle radar topography mission—a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *57*(4). doi:[https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(02\)00124-7](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(02)00124-7)
- Ralph, F. M., Dettinger, M. D., Cairns, M. M., Galarneau, T. J., & Eylander, J. (2018). Defining "atmospheric river": how the Glossary of Meteorology helped resolve a debate. *Bull Amer Meteor Soc*, *99*(4), 837–839. doi:<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0157.1>
- Ralph, F. M., Rutz, J. J., Cordeira, J. M., Dettinger, M., Anderson, M., Reynolds, D., . . . Smallcomb, C. (2019). A Scale to Characterize the Strength and Impacts of Atmospheric Rivers. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, *100*, 269–289. doi:<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0023.1>
- Ralph, M. F., Waliser, D. E., Dettinger, M. D., Rutz, J. J., Anderson, M. L., Gorodetskaya, I. V., . . . Neff, W. (2020). The Future of Atmospheric River Research and Applications. En F. M. Ralph, M. D. Dettinger, J. J. Rutz, & D. E. Waliser (Edits.), *Atmospheric Rivers* (págs. 219–247). Switzerland: Springer. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-030-28906-5>
- Reichenbach, P., Rossi, M., Malamud, B. D., Mihir, M., & Guzzetti, F. (2018). A review of statistically-based landslide susceptibility models. *Earth-Science Reviews*, *180*, 60–91. doi:<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.03.001>
- Roberts, S., Jones, J. N., & Boulton, S. J. (2021). Characteristics of landslide path dependency revealed through multiple resolution landslide inventories in the Nepal Himalaya. *Geomorphology*, *390*, 107868. doi:<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107868>
- Romero, J. E., Moreno, H., Polacci, M., Burton, M., & Guzmán, D. (2022). Mid-Holocene lateral collapse of Antuco volcano (Chile): debris avalanche deposit features, emplacement dynamics, and impacts. *Landslide*, *19*, 1321–1338. doi:<https://doi.org/10.1007/s10346-022-01865-z>
- Saavedra, F., Cortés, G., Viale, M., Margulis, S., & McPhee, J. (2020). Atmospheric Rivers Contribution to the Snow Accumulation Over the Southern Andes (26.5° S–37.5° S). *Front. Earth Sci.*, *8*. doi:<https://doi.org/10.3389/feart.2020.00261>

- Samia, J., Temme, A., Bregt, A., Wallinga, J., Guzzetti, F., & Ardizzone, F. (2017). Do landslides follow landslides? Insights in path dependency from a multi-temporal landslide inventory. *Landslide*, 14, 547–558. doi:<https://doi.org/10.1007/s10346-016-0739-x>
- Samia, J., Temme, A., Bregt, A., Wallinga, J., Guzzetti, F., & Ardizzone, F. (2020). Dynamic path-dependent landslide susceptibility modelling. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 20, 271–285. doi:<https://doi.org/10.5194/nhess-20-271-2020>
- 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>
- Schuster, R. L., & Costa, J. E. (1986). Perspective on landslide dams. En R. L. Schuster (Ed.), *Landslide Dams: Processes, Risk, and Mitigation. Proceedings of a Session in Conjunction with the ASCE Convention* (págs. 1-20). New York: American Society of Civil Engineers.
- Serey, A., Piñero-Feliciangeli, L., Sepúlveda, S. A., Poblete, F., Petley, D. N., & Murphy, W. (2019). Landslides induced by the 2010 Chile megathrust earthquake: a comprehensive inventory and correlations with geological and seismic factors. *Landslide*, 16, 1153-1165. doi:<https://doi.org/10.1007/s10346-019-01150-6>
- SERNAGEOMIN. (2003). *Mapa Geológico de Chile: Versión digital*. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería .
- SERNAGEOMIN. (14 de Julio de 2024). *Portal GEOMIN*. Obtenido de Catálogo Nacional de Información Geológica y Minera: <https://portalgeomin.sernageomin.cl/>
- Strahler, A. (2013). *Introducing Physical Geography* (6th ed.). United States of America: Wiley.
- Temme, A., Guzzetti, F., Samia, J., & Mirus, B. (2020). The future of landslides' past—a framework for assessing consecutive landsliding systems. *Landslides*, 17, 1519–1528. doi:<https://doi.org/10.1007/s10346-020-01405-7>
- Thiele, R., Moreno, H., Elgueta, S., Lahsen, A., Rebolledo, S., & Petit-Breuilh, M. E. (1998). Evolución geológico-geomorfológica cuaternaria del tramo superior del valle del río Laja. *Revista Geológica de Chile*, 25(2), 229-253.
- Thornton, J. M., Palazzi, E., Pepin, N. C., Cristofanelli, P., Essery, R., Kotlarski, S., . . . Adler, C. (2021). Toward a definition of Essential Mountain Climate Variables. *Perspective*, 4(6), 805-827. doi:<https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.05.005>
- Ungvarsky, J. (2023). Dielectric constant. *Salem Press Encyclopedia of Science*. Obtenido de <https://research.ebsco.com/linkprocessor/plink?id=c8ffd704-89a4-369cbfff->
- Vásquez, R. (2020). *Climatología y tendencia de la altura de la isoterma cero*. Dirección Meteorológica de Chile.
- Yang, D., Qiu, H., Hu, S., Zhu, Y., Cui, Y., Du, C., . . . Cao, M. (2021). Spatiotemporal distribution and evolution characteristics of successive landslides on the Heifangtai tableland of the

Chinese Loess Plateau. *Geomorphology*, 378.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107619>

Yano, A., Shinohara, Y., Tsunetaka, H., Mizuno, H., & Kubota, T. (2019). Distribution of landslides caused by heavy rainfall events and an earthquake in northern Aso Volcano, Japan from 1955 to 2016. *Geomorphology*, 327, 533-541.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.11.024>

Yong, C., Jinlong, D., Fei, G., Bin, T., Tao, Z., Hao, F., . . . Qinghua, Z. (2022). Review of landslide susceptibility assessment based on knowledge mapping. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 36, 2399–2417. doi:<https://doi.org/10.1007/s00477-021-02165-z>

Zscheischler, J., Martius, O., Westra, S., Bevacqua, E., Raymond, C., Horton, R. M., . . . Vignotto, E. (2020). A typology of compound weather and climate events. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1, 333–347. doi:<https://doi.org/10.1038/s43017-020-0060-z>

7. ANEXO

Anexo 1: Tabla de resultados

		Pre-evento		Post-evento		RM				SUPERFICIE AFECTADA					ELEVACIÓN MÁXIMA						
Evento	GRILLA	Asc-img	Desc-img	Asc-img	Desc-img	DT	DI	FE	AE	TOTAL	DT	DI	FE	AE	TOTAL	DT	DI	DF	AE		
1	G009	26	60	20	40		1	14	1	16			3999	232528	5445	241972		1024	1858	1210	
	G010	26	60	20	40			2		2			118622			118622			1466		
	G011	58	30	39	21			1		1			4961			4961			1722		
	G020	26	91	20	59	2		3	1	6	7385		21198	29494	58077	962		1276	1163		
	G021	26	31	20	21																
	G022	26	30	20	21			1		1			10449			10449			1703		
	G031	26	119	20	80	2		4		6	10431		41550			51981	1446		1253		
	G032	26	60	20	42				5	5				141119	141119				1841		
	G033	26	60	20	42																
	G042	26	60	20	40	1		2	3	6	4434		14963	21273	40670	571		1339	1811		
	G043	26	30	20	21																
	G044	26	30	20	21																
	G052	52	30	34	18																
	G053	52	30	40	21																
G054	52	30	40	21	2		2		4	16350		30917			47267	1648		1612			
G064	26	30	20	21																	
	TOTAL	526	781	393	529	7	1	29	10	47	38600	3999	475188	197331	715118						
2	G009	28	64	17	35																
	G010	28	64	17	35																
	G011	63	32	34	18																
	G020	28	97	17	52																
	G021	28	33	17	18																
	G022	28	32	17	18																
	G031	28	127	17	70																
	G032	28	64	17	36																
	G033	28	64	17	36																
	G042	28	64	17	35																
	G043	28	32	17	18																
	G044	28	32	17	18																
	G052	56	32	34	18																
	G053	56	32	34	18																
G054	56	32	34	18																	
G064	28	32	17	18																	
	TOTAL	567	833	340	461	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
3	G009	31	69	15	30		1	4		5			5057	21928		26985		1474	1210		
	G010	31	69	15	30																
	G011	68	35	30	16																
	G020	31	104	15	44			1		1			14197		14197			1237			
	G021	31	36	15	16	1				1	7052					7052	1270				
	G022	31	35	15	16																
	G031	31	137	15	60																
	G032	31	70	15	32				1	1				21356	21356				1712		
	G033	31	70	15	32																
	G042	31	69	15	30																
	G043	31	35	15	16																
	G044	31	35	15	16																
	G052	62	35	30	16																
	G053	62	35	30	16																
G054	62	35	30	16																	
G064	31	35	15	16																	
	TOTAL	626	904	300	402	1	1	5	1	8	7052	5057	36125	21356	69590						
4	G009	54	116	8	15																
	G010	54	116	8	15																
	G011	115	58	15	7																
	G020	54	175	8	23																
	G021	54	59	8	7																
	G022	54	58	8	7																
	G031	54	231	8	30																
	G032	54	116	8	14																
	G033	54	116	6	12																
	G042	54	116	8	15																
	G043	54	58	8	7																
	G044	54	58	8	7																
	G052	108	58	16	7																
	G053	108	58	16	7																
G054	108	58	16	7																	
G064	54	58	8	7																	
	TOTAL	1087	1509	157	187	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
					TOTAL	8	2	34	11	55	45652	9056	511313	218687	784708						

Anexo 2: Inventario geomorfológico de remociones en masa

Enlace: <https://github.com/Lgajardo87/lrmcArBbio.git>