

Aplicaciones Geomáticas en La Gestión de Riesgos Naturales: Remociones en Masa en Ruta 115 CH, Paso Pehuenche, Región del Maule.

Geomatics Applications in Natural Hazard Management: Mass Movements on Route 115 CH, Paso Pehuenche, Maule Region.

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historial del
artículo:

Recibido
14-11-2023
Aceptado
03-08-2024
Publicado
23-12-2024

Palabras Clave:
Remociones en
Masa
Geomática
Gestión de Riesgos
Naturales

Article history:

Received
14-11-2023
Accepted
03-08-2024
Available
23-12-2024

Keywords:
Mass Movements
Geomatics
Natural Hazard
Management

César Becerra ^{1,*}, Jacqueline De Rurange ², Mario Guiachetti ³

¹Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Planeamiento, Talca, Chile.

²Universidad Católica del Maule, Facultad de Ciencias de La Ingeniería, Talca, Chile.

³Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Vialidad, Talca, Chile.

Resumen

Se generaron estudios basados en aplicación de tecnologías geomáticas para la evaluación y gestión de riesgos naturales para remociones en masa en rutas cordilleranas, específicamente en ruta 115 CH, Paso Pehuenche, Región del Maule. El primer estudio generó un modelo cualitativo-cuantitativo para determinar el nivel de susceptibilidad para un sector de la ruta 115 CH. Se aplicó este modelo basándose en análisis de terreno y uso de geomática. Se analizó con trabajo de campo, modelos de elevación digital (DEM), imágenes satelitales y fotos aéreas. Los resultados obtenidos establecen que existen altas susceptibilidades a deslizamientos, flujos de detritos y desprendimientos de rocas, por las condiciones de geomorfología, rocas altamente meteorizadas, fuertes pendientes, baja cobertura de vegetación y topografía con intervención antrópica, factores óptimos para la generación de estos procesos geodinámicos. El segundo estudio es un análisis multitemporal de remociones en masa del tipo deslizamiento rotacional, ubicado en km 135 de ruta 115 CH, para determinar evolución y seguimiento de este proceso geodinámico, basándose en comparación de Modelos de Elevación Digital (DEM) procesados de vuelos LIDAR (Light detection and ranging) y UAV (Unmanned Aerial Vehicle), uso de geomática y trabajo de campo. Los resultados obtenidos establecen movimientos superficiales de deslizamientos mayores a un metro, en un periodo de 20 meses, debido a las condiciones óptimas para la generación de estos movimientos como suelos altamente saturados, fuertes pendientes y topografía con intervención antrópica. La aplicación Geomática entrega herramientas de prevención, constituyendo un instrumento para el análisis y la gestión ambiental territorial para rutas cordilleranas.

Abstract

Studies were conducted based on the application of geomatic technologies for the evaluation and management of natural hazards related to mass movements on mountain routes, specifically on Route 115 CH, Paso Pehuenche, Maule Region. The first study developed a qualitative-quantitative model to determine the level of susceptibility for a section of Route 115 CH. This model was applied based on terrain analysis and the use of geomatics. Fieldwork, digital elevation models (DEM), satellite images, and aerial photographs were analyzed. The results indicate high susceptibility to landslides, debris flows, and rockfalls due to geomorphological conditions, highly weathered rocks, steep slopes, low vegetation cover, and anthropogenic topography, which are optimal factors for the generation of these geodynamic processes. The second study is a multi-temporal analysis of mass movements of the rotational landslide type, located at km 135 of Route 115 CH, to determine the evolution and monitoring of this geodynamic process. It was based on the comparison of Digital Elevation Models (DEMs) processed from LIDAR (Light Detection and Ranging) flights and UAVs (Unmanned Aerial Vehicles), as well as the use of geomatics and fieldwork. The results indicate surface movements of landslides greater than one meter over a period of 20 months, due to optimal conditions for the generation of these movements such as highly saturated soils, steep slopes, and anthropogenic topography. Geomatics applications provide prevention tools, constituting an instrument for environmental and territorial management analysis for mountain routes.

* Corresponding author at: César Becerra, Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Planeamiento, Av. 1 Oriente 1253, Talca, Chile.

E-mail address: cesar.becerra@mop.gov.cl

RIOCI

journal homepage: <https://revistas.ufro.cl/ojs/index.php/rioc/index>

Vol. 12, no. 03, pp. 1–10, Diciembre 2024

1. Introducción.

En la actualidad, se ha incrementado el uso y aplicación de las tecnologías geomáticas para el control y seguimiento de los riesgos naturales, debido al impacto y daño que generan, dando como resultado el planteamiento y desarrollo de diversas técnicas. En este contexto, se encuentran las metodologías de medición a través de Interferometría Diferencial de Radar de Apertura Sintética (DInSAR), los métodos fotogramétricos de alta precisión, datos LIDAR (Light detection and ranging), datos UAV (Unmanned Aerial Vehicle), escaneo de láser terrestre entre otros para generación de Modelos de elevación Digital (DEM) (Doshida, 2021; Pellicani et al, 2019; Zhao et al., 2018; Golovko, 2018; Jaboyedoff, 2018; Fernández et al., 2015). Un tipo de riesgo natural, son las remociones en masa que son procesos de movilización lenta o rápida de determinado volumen de suelo, roca o ambos, en diversas proporciones, generados por una serie de factores (Hauser, 1994). Según Cruden & Varnes (1996) son movimientos de una masa de roca, escombros o tierra por una pendiente, bajo la influencia de la gravedad. Este proceso geodinámico es uno de los de origen natural más destructivos que afectan a los seres humanos, causando miles de muertes, daños en las infraestructuras y pérdidas monetarias enormes cada año en todo el mundo (Dragičević, Lai y Balram, 2015; Hamza y Kumar, 2017; Doshida, 2021; Becerra y De Rurange, 2021).

La evaluación de la amenaza implica localizar las áreas inestables, determinando, además, el tipo de los movimientos en masa, estableciendo los factores relacionados con la estabilidad y su contribución a la inestabilidad. Hauser (1994) indica que el agua es uno de los elementos desencadenantes al originar drásticas disminuciones en la resistencia al corte y presiones intersticiales a lo largo de potenciales planos o superficies de ruptura, situación bastante frecuente y conocida en Chile, dada la configuración del relieve, causando graves daños en vidas humanas, infraestructura y bienes materiales. Según Santacana et al (2003) y Bonachea (2006), las metodologías existentes para la obtención de análisis de áreas susceptibles a remociones en masa no se encuentran estandarizadas, no hay unanimidad en cuanto a la cantidad y tipo de variables a utilizar. Se hace necesario diferenciar el modelo de evaluación de la amenaza, siendo la base el concepto susceptibilidad, el cual se define como el grado de predisposición

que tiene un sitio o área en el que se genere una amenaza, debido a sus condiciones intrínsecas y factores detonantes (Becerra, 2006). Los modelos que integran susceptibilidad con tratamiento de variables con uso de geomática, parecen los más indicados para el trabajo con procesos naturales que causan desequilibrios entre el medio físico y la actividad humana (Becerra y De Rurange, 2018).

El objetivo es desarrollar aplicaciones de tecnologías geomáticas para la evaluación y gestión de riesgos naturales. El primer estudio es un modelo de análisis de susceptibilidad de procesos de remociones en masa en Ruta Internacional Paso Pehuenche (rol 115-CH, 26,9 km aprox.) sobre la base de un modelo de enfoque heurístico – determinístico y el segundo estudio es un análisis multitemporal del proceso geodinámico utilizando Modelos de Elevación Digital (DEM) procesados de vuelos LIDAR (Light detection and ranging) y UAV (Unmanned Aerial Vehicle), con uso de geomática y trabajo de campo (Figura 1. Área de estudio).

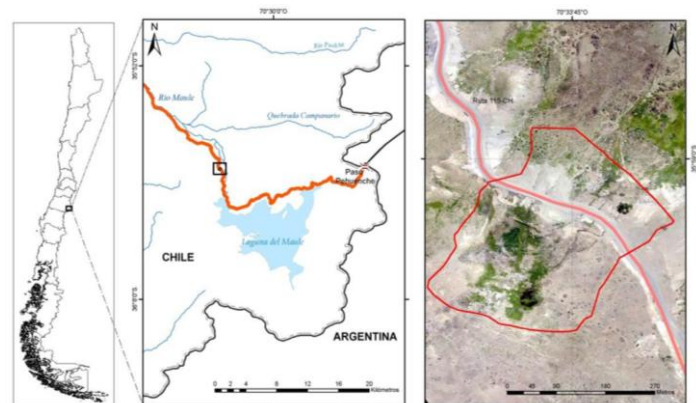


Figura 1. Área de estudio.

2. Metodología.

Para el modelo de susceptibilidad, se utilizó una integración entre el método heurístico-determinístico, en base a identificación de factores que infieren una situación de susceptibilidad de los terrenos a remociones en masa. Se determinó una clasificación de remociones en masa, definida por movimiento, tipo y material comprometido (Tabla 1).

Tabla 1. Clasificación de remociones en masa para ambientes cordilleranos.

Movimiento	Tipo	Material Comprometido
Flujos/Coladas (Flows)	Barro/ lodo	Material fino (fluido viscoso), regolito fino y limo arcilla. Derrubios, regolito (suelo), pequeñas rocas, residuos
	Detritos	Derrubios, regolito (suelo), pequeñas rocas, residuos
	Bloques rocosos/rocas	Derrubios, regolito (suelo), rocas medianas, residuos (escombros).
	Detritos	Masa de suelo (regolito), derrubios, pequeños a medianos bolones de rocas, superficie del manto o lecho rocoso, arcillas duras, escombros.
Deslizamientos (Slide)	Detritos/bloques rocosos	Masa de suelo (regolito), detritos de diferente tamaño, masa del sustrato rocoso (una o más unidades), bolones de rocas medianas (derrubios).
	bloques rocosos/rocas	Masa del sustrato rocoso (una o más unidades), rodados de rocas medianas (derrubios), detritos medios y regolito, escombros.
	Caída de rocas Derrumbes	Unidades individuales de rocas, bloques sanos y desfragmentados.
Desprendimientos (Falls)	Derrumbes	Unidades colectivas de rocas, bloques sanos y desfragmentados.
	Tierras	Porciones de terreno (suelo/tierra/roca), material fino, regolito fino y limo arcilla, material no consolidado de tamaño muy pequeño.
Caóticos o Complejos (Complex)		Dos o más tipos de movimientos.

Generada la clasificación, se identificó y georrefención, los tipos de remociones en masa con análisis de fotos aéreas, imágenes satelitales y trabajo de campo. Se identificaron los factores condicionantes que tienen incidencia considerable con la

susceptibilidad de este proceso geodinámico, a través de criterios utilizados en estudios de zonas cordilleranas de Chile central, como la carretera El Cobre perteneciente a la División el Teniente de Codelco-Chile (Tabla 2).

Tabla 2. Factores condicionantes.

Variable	Caracterización	Clases de referencia/ enfoque determinístico				
Pendiente	Grados	0-10	0-20	20-30	30-45	45-90
Exposición	Orientación	Sur	Sureste-Suroeste	Este-Oeste	Noreste-Noroeste	Norte
Dinámica de Vertiente	Forma-Proceso	Cóncavo, depositación	Convexo	Declive	Sector rectilíneo	Free faces, caralibre
Geología	Unidades litológicas superficiales	Depósitos aluviales y coluviales o consolidados	Depósitos fluvio-glaciares y fluvioaluvionales no consolidados	Rocas con alteración hidrotermal	Rocas volcánicas plioceno-mioceno. Rocas volcánicas y sedimentarias plioceno-pleistoceno. Meteorización.	Rocas volcánicas y coladas de lava pleistoceno-holoceno. Meteorización.
Vegetación	Vigor	Nulo	Bajo	Mediano	Alto	Muy Alto
Trabajo de campo/ enfoque heurístico Erosión y acumulación de material Estado de litología (roca y suelo) Acciones antrópicas: consecuencias Permeabilidad (drenaje/humedad)						

Para la generación del Modelo Digital de Elevación (DEM), se utilizó el modelo GDEM ASTER, generado a partir de imágenes captadas por el sensor Japonés Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer. Su resolución espacial es de 30 m. Se utilizó imagen satelital Landsat 8 (NASA), con una resolución espacial de 30 m y ortofotovuelo SAF-ENDESA, escala

1:40:000 año 2006. Los datos de percepción remota se georreferenciaron en datum mundial WGS84, coordenadas UTM y Huso 19. La cartografía auxiliar utilizada fue la hidrografía, red de caminos y sistema lacustre, escala 1:50.000 del Instituto Geográfico Militar (IGM), año 2010 en datum mundial WGS84, coordenadas UTM y Huso 19. Para el tratamiento de la

información satelital, vectorial y ráster se utilizó el programa ArcGis versión 10.2.1.

Del modelo ASTER se generó curvas de nivel de equidistancia 25 m. Para la generación del DEM se utilizó el método de interpolación TIN (triangulated irregular network), de acuerdo a lo establecido por Felicísimo (1994). Se generó ráster matricial de tamaño de celda de 25 m. Con esta matriz se originaron capas ráster de pendientes, orientación, sombras y dinámica de vertientes.

Para estudiar la estructura de la vegetación, se construyó el índice de vegetación de diferencia normalizada. Este índice relacionó el vigor o estrés de la vegetación, el cual varía entre -1 y +1. (Wang & Peng, 2009). Para integración de litología, se utilizó capa

vectorial y se integró a ráster. Se clasificó los datos ráster según clases de referencia en tabla 2 y se determinó el porcentaje que ocupan los rangos más elevados de cada variable utilizada, estableciendo las clases que generan una mayor activación del proceso desde un orden de mayor a menor importancia dentro del área de estudio.

Los datos obtenidos de trabajo de campo (tipos de movimientos, acción antrópica, erosión y acumulación de material, estado de litología, permeabilidad, humedad, etc.), se integran a capa vectorial de tipos de remociones en masa. Integrando los datos ráster y vectoriales, se generó cartografía de susceptibilidad de remociones en masa. En la figura 2 se observa el esquema metodológico para la evaluación de susceptibilidad a remociones en masa.

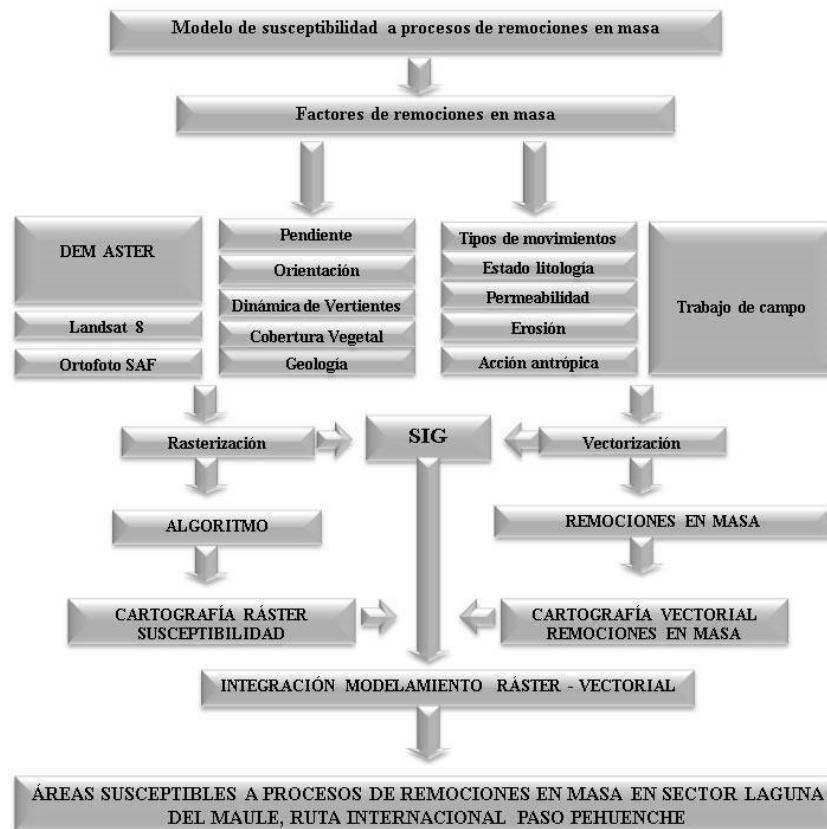


Figura 2. Esquema metodológico para la evaluación de susceptibilidad a remociones en masa.

La metodología para el sector específico, se basó en la generación de DEM de alta resolución, obtenidos de vuelos procesados de LIDAR y UAV, a través de softwares SIG (Sistema de Información Geográfica). Para Vuelo LIDAR se utilizó el vuelo aerofotogramétrico realizado en marzo de 2017, avión CESSNA 206 Turbo, sensor láser Toposys Harrier 56/ G4 – Riegl LMS-Q560, cámara Rollei AIC P45 (distancia focal: 47 mm), con altura media del vuelo de 300 metros snmm, con resolución decimétrica. Para

UAV se utilizó un vuelo aerofotogramétrico realizado en diciembre de 2018, con dron Phantom 4, con altura media del vuelo de 147 metros snmm, modelo cámara FC330 (3.61 mm), número de imágenes 538, resolución centrimétrica. Mediante postproceso se obtuvo de ambos vuelos, imágenes de alta resolución de espectro visible (RGB) y nube de puntos (X, Y, Z). Los datos obtenidos se georreferenciaron en datum mundial WGS84, coordenadas UTM y Huso 19.

Para la generación del DEM, tanto LIDAR y UAV, se utilizó el método de interpolación TIN (Triangulated Irregular Network) utilizando puntos de elevación, de acuerdo a lo establecido por Felicísimo (1994). Se generaron ráster matricial de tamaño de celda de 10 cm. Con esta matriz se originaron capas ráster de pendientes y sombras. La fotointerpretación de las ortofotos reveló las principales características geomorfológicas. El análisis de sombras (monobanda) y pendientes se realizaron para identificar dinámica en formas y procesos. Los datos obtenidos de

trabajo de campo se integran a capa vectorial de deslizamiento rotacional. Se comparan los DEM mediante algebra de mapas, para identificar dinámica en las características geomorfológicas superficiales del deslizamiento en términos de cambios topográficos en la superficie y desplazamientos horizontales. Integrando los datos se generó cartografía evolutiva de deslizamiento de sector Monjes Blancos. En la figura 3 se observa el esquema metodológico.



Figura 3. Esquema metodológico para cartografía evolutiva de deslizamiento sector Monjes Blancos.

3. Análisis de resultados.

Mediante la aplicación de la metodología del estudio de susceptibilidad de remociones en masa, se generaron las cartas temáticas ráster de factores condicionantes, que inciden en la susceptibilidad del modelo de remociones en masa. En las secciones de inicio y media de la cartografía temática, existen pendientes altas (30° a 45°) y muy altas (45° o más), las que establecen un rol importante en la inestabilidad de ladera determinada por el arrastre de material, desde esas áreas superiores hacia sectores más depresionales. Se presenta variados tipos de litología del sector de la Laguna del Maule, con diferentes tipos de suelo y roca. El estado de la litología superficial, están determinadas en trabajo de campo. Los sectores que dominan el área de estudio son los cóncavos y convexos, sobre todo en red vial. En cuanto a los sectores que presentan declive, estos ocupan toda la parte alta, lo que infiere una

acumulación de material en dichas partes, considerando los sectores de cara libre (free faces) y rectilíneo, debido a su inclinación y procesos comprometidos (erosión, depositación, lavado superficial, abanicos, flujos y deslizamientos). Los sectores con vigor de vegetación muy alto (valores 0,75 a 0,6) y alto (valores 0,6 a 0,45), están determinados por los cursos de agua, humedad intersicial de los poros por la acumulación nival y umbría. En gran parte de la ruta internacional Paso Pehuenche, se determinaron áreas con orientación Sur, Suroeste-Sureste, lo que determina una importante umbría la mayor parte del día. En cambio, los rangos Norte, Noreste y Noroeste manifestaron áreas con mayor insolación, menor cobertura vegetal y mayor erosión superficial.

Tabla 4: Susceptibilidad, rangos, área de influencia y porcentaje ocupado por las variables de pendiente, orientación, geología, dinámica de vertientes y vegetación.

Susceptibilidad ráster	Pendiente			Orientación			Geología			Dinámica de vertientes			Vegetación		
Clasificación	Rango	Área km²	%	Rango	Área km²	%	Rango	Área km²	%	Rango	Área km²	%	Rango	Área km²	%
Muy bajo	0°-10°	8,987	26,12	Sur	7,383	21,68	Volcanes y coladas de lavas pleistoceno – holoceno.	6,674	19,45	Cóncavo	7,388	20,86	Muy alto	5,274	15,41
Bajo	10°-20°	10,762	31,28	Suroeste-Sureste	11,631	34,15	Rocas volcánicas plioceno – mioceno/ sedimentarias miocenas	15,666	45,66	Convexo	3,451	9,75	Alto	5,876	17,16
Medio	20°-30°	9,42	27,38	Este-Oeste	7,795	22,89	Rocas con alteración hidrotermal/ Volcánicas sedimentarias plioceno y mioceno	2,8604	8,34	Declive	16,763	47,34	Bajo	11,087	32,38
Alto	30°-45°	5	14,53	Noreste-Noroeste	3,79	11,13	Depósitos fluvioglaciales y fluvioaluvionales no consolidados.	4,351	12,68	Rectilíneo	4,668	13,18	Muy bajo	2	5,84
Muy Alto	45°-90°	0,237	0,69	Norte	3,461	10,16	Depósitos aluviales y coluviales no consolidados.	4,761	13,88	Free Faces	3,143	8,88	Nulo	9,998	29,20
Relación mayores Incidencias de peso (%)			73,88				21,289						35,046		
Algoritmo: porcentaje de cada variable (%)			33				9						15		
							12						31		

3.1. Integración de variables ráster al SIG.

Se analizaron las cartas temáticas ráster con el fin de establecer diferentes pesos en porcentajes (tabla 4). De manera estadística se determinó el porcentaje que ocupan los rangos más elevados de cada variable utilizada, estableciendo un orden de mayor a menor importancia. Con cada variable se obtiene el porcentaje de las clases seleccionadas, derivado del total de área de afección de las remociones en masa. Cada porcentaje es ponderado con el porcentaje total de las variables seleccionadas, generando el dato estadístico para el algoritmo ráster ($\text{Susceptibilidad} = ([\text{dinámica de vertientes}] * 31 + [\text{pendiente}] * 33 + [\text{geología}] * 12 + [\text{exposición}] * 9 + [\text{vegetación}] * 15)$), el cual generó la cartografía de susceptibilidad ráster (figura 4) y mediante método estadístico bivalente se integra a cartografía de tipos de remociones en masa (figura 5), definiendo mediante los porcentajes más altos de susceptibilidad ráster y los datos de caracterización heurística de trabajo de campo, la clasificación de susceptibilidad por tipo de remociones en masa (figura 6).

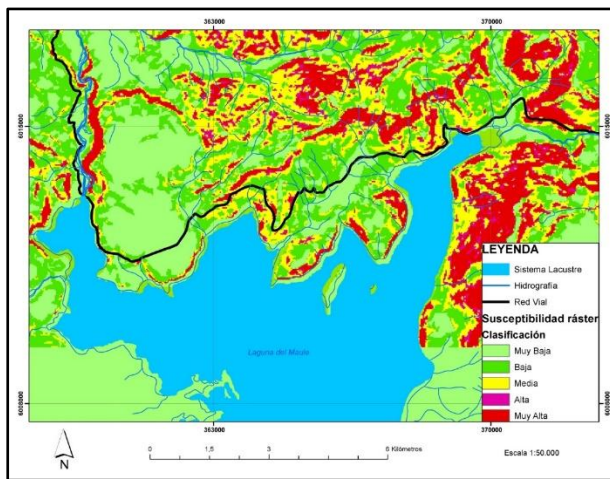


Figura 4. Cartografía ráster de susceptibilidad.

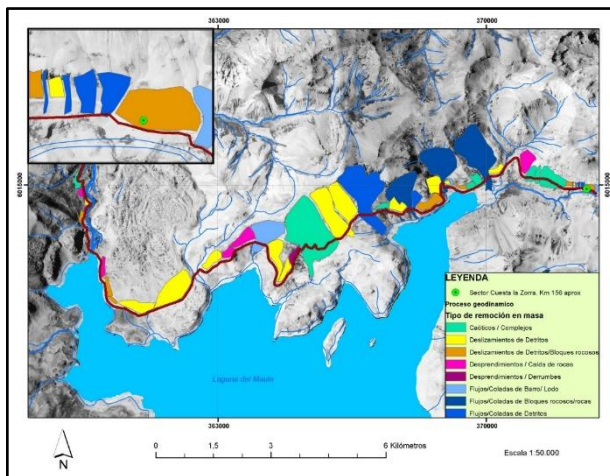


Figura 5. Cartografía de tipos de remociones en masa y punto de caracterización de terreno.

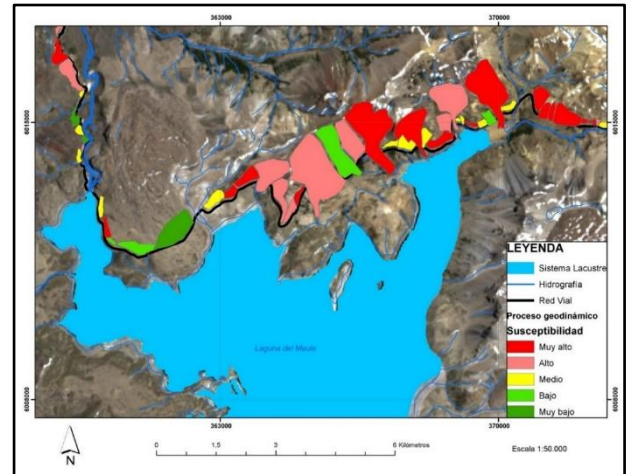


Figura 6. Cartografía de susceptibilidad de remociones en masa sector Laguna del Maule, Paso Pehuenche.

3.2. Análisis multitemporal del proceso geodinámico.

Teniendo este resultado, en el área específica se trabajó con datos de mayor resolución, para obtener análisis con mayor detalle. Mediante la aplicación de la metodología, se generaron las cartas temáticas ráster DEM, de pendientes y sombras. La toma espacio-temporal entre cada vuelo fue de 20 meses aproximadamente. En características de los DEM, se presentan bajas alteraciones en los datos estadísticos, lo que determina cambios en las formas superficiales.

La cartografía ráster de sombreado, presenta las principales características morfológicas del deslizamiento rotacional, principalmente escarpes, regueras, cárcavas y variadas grietas de diferente magnitud, que afectan al deslizamiento rotacional. Para cartografías ráster de pendientes, en sección cercana a la carretera, se presentan fuertes pendientes (30° o más) debido al corte del talud, las que establecen un rol importante en la inestabilidad de ladera. En la parte inferior izquierda existen fuertes pendientes, las que determinan arrastre de material, desde esas áreas superiores hacia sectores más bajos. Además, existen escarpes desde la base del deslizamiento con pendientes considerables. Al comparar las cartografías, tanto pendientes como sombreado, existen diferencias las que inciden en la superficie del deslizamiento y determina cambios en dinámica de geoformas.

La diferencia superficial multitemporal entre los dos vuelos utilizados en área de estudio (figura 7A) determinó dinámicas constantes del deslizamiento. Se clasificó 5 niveles, los cuales los mayores rangos (75 - 100 cm y 100 - 145 cm) están en menor cantidad, pero su distribución está casi en toda el área de estudio. Los rangos intermedios (50 - 75 cm) están concentrados en su mayoría en cabecera de talud, que se determina en la

caracterización geomorfológica (figura 7B). Los menores niveles (0 a 25 cm y 25 a 50 cm) están distribuidos en toda el área del deslizamiento, concentrados principalmente en talud y en acumulación de rocas y pequeñas rocas en sector inferior izquierdo de deslizamiento. La dirección de los movimientos se analizó en trabajo de campo, el cual presenta variadas orientaciones por lo desniveles y deformación de superficie. No fue posible obtener mayor información en los sectores de subsidencia, debido al peligro de desplazamiento por suelos altamente blandos y saturados.

La diferencia superficial multitemporal entre los dos vuelos utilizados en área de estudio (figura 7A) determinó dinámicas constantes del deslizamiento. Se clasificó 5 niveles, los cuales los mayores rangos (75 - 100 cm y 100 - 145 cm) están en menor cantidad, pero su distribución está casi en toda el área de estudio. Los rangos intermedios (50 - 75 cm) están concentrados en su mayoría en cabecera de talud, que se determina en la caracterización geomorfológica (figura 7B). Los menores niveles (0 a 25 cm y 25 a 50 cm) están distribuidos en toda el área del deslizamiento, concentrados principalmente en talud y en acumulación de rocas y pequeñas rocas en sector inferior izquierdo de deslizamiento. La dirección de los movimientos se analizó en trabajo de campo, el cual presenta variadas orientaciones por lo desniveles y deformación de superficie. No fue posible obtener mayor información en los sectores de subsidencia, debido al peligro de desplazamiento por suelos altamente blandos y saturados (Figura 7).

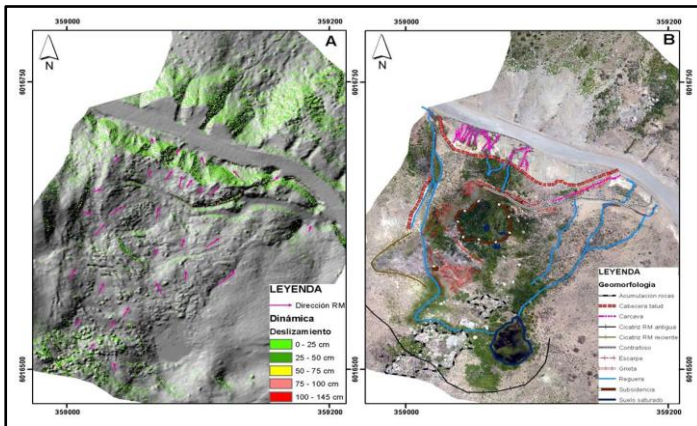


Figura 7. Cartografía evolutiva de deslizamiento rotacional sector Monjes Blancos. Sombreado con diferencia superficial multitemporal (20 meses) de dinámica de deslizamiento entre modelos DEM LIDAR-UAV. (A). Dinámica del deslizamiento. (B). Caracterización geomorfológica de deslizamiento con ortofoto UAV.

4. Conclusiones.

Este estudio analizó aspectos asociados a la integración de Geomática con trabajo de campo, generando modelos y análisis multiemporales, lo cual concluye:

1. El estudio de susceptibilidad permite realizar un primer análisis de las remociones en masa en el área de estudio, debido a que se obtuvieron comportamientos de variables que inciden en su desencadenamiento. Las características tanto geográficas, geomorfológicas, geológicas y antrópicas del área de estudio, generan condiciones que favorecen el desarrollo de procesos morfogenéticos de remociones en masa, asociados a la influencia gravitacional, morfología abrupta, intervención antrópica, variabilidad altitudinal y climática. La susceptibilidad de generarse este proceso geodinámico es alto, con un 65,3 % de las áreas con susceptibilidades muy altas y altas del total cuantificadas. Las áreas de susceptibilidad alta y muy alta, se encuentran vinculadas principalmente a pendientes mayores a 20°, escasa cobertura vegetal, con exposición norte, noreste y noroeste, con morfología de cara libre (free faces), rocas altamente meteorizadas y fracturadas y alta intervención antrópica. Se desarrollan principalmente los tipos de remociones en masa de deslizamientos (23%), desprendimientos (21,1%), flujos (17,3%) y caóticos (15,3%) de total cuantificado.
2. Aquellas zonas con susceptibilidad media, baja y muy baja se encuentran asociadas a pendientes planas y suaves (0 a 20°), exposiciones bajas (Sur, Suroeste y Oeste), cobertura vegetal moderada y alta, desarrolladas en sectores de morfología de declive y convexidad, unidades litológicas estables con baja meteorización y cercanas a drenes. Estos presentan una susceptibilidad inferior de producir algún proceso de remociones en masa.
3. Los procesos de remociones en masa con mayor actividad en el área de estudio son los deslizamientos, de cualquier tipo según la clasificación propuesta. Los flujos son lo que pueden provocar daños en la vía de comunicación, activados por condicionantes: pendiente alta, erosión severa, nula cobertura vegetal, meteorización fina y el principal factor las precipitaciones. Se requiere modelo de susceptibilidad distinto, para este tipo de remoción en masa, derivado específicamente a geomorfología fluvial y estudio de precipitaciones (pluviales y nivales). El tipo de remoción en masa, que puede generar mayores daños en las vías de comunicación, es el desprendimiento o la caída de bloques por alta rapidez en su detonación y representar accidentes con posibles consecuencias fatales. La viabilidad, rapidez y facilidad para la obtención de datos, derivados en factores mediante la utilización del SIG, hace viable la manipulación de este modelo para rutas cordilleranas.

4. El estudio específico permite realizar un primer análisis multitemporal de deslizamiento rotacional en área de

estudio utilizando los DEM de alta resolución y de diferentes plataformas (LIDAR y UAV). Los resultados obtenidos establecen movimientos superficiales de deslizamientos mayores a 1 m, en un rango de 20 meses. Las características geomorfológicas, geológicas y antrópicas del área de estudio, generan condiciones que favorecen el desarrollo de estos procesos morfogenéticos como deslizamientos del tipo rotacional.

5. Los resultados obtenidos permitieron demostrar la eficacia de combinar los métodos UAV – LIDAR para evaluar características geomorfológicas y proceso evolutivo de la inestabilidad. Además, se obtiene un grado de conocimiento para la gestión territorial de esta ruta internacional de Chile central. Los DEM y las ortofotos son efectivas y coherentes para la correcta fotointerpretación de factores dinámicos superficiales y modelamiento ráster de álgebra de mapas. El análisis y el seguimiento del comportamiento evolutivo del deslizamiento rotacional, podría complementarse integrando las técnicas de teledetección, como la interferometría radar satelital (InSAR), para una caracterización detallada de las tasas de desplazamiento espacial y de mayor rango temporal.
6. Los deslizamientos rotacionales son movimientos subsuperficiales complejos de analizar, por lo que se requiere mayores monitoreos multitemporales, análisis de laboratorio, estudios topoclimáticos y generación topografía de campo, para determinar la profundidad de la falla del material y la influencia del nivel de las aguas subterráneas que se relacionan a la pérdida de resistencia del material. La metodología demostró ser una herramienta viable y factible para comparar dinámica superficial del proceso geodinámico.
7. Los resultados que se establecieron en estos estudios, deberían ser solicitados y aplicados en el momento de realizar los estudios de ingeniería, para proyectar las obras necesarias antes de la construcción y que estas se materialicen durante la obra, para así evitar entregar una ruta susceptible a la generación de procesos geodinámicos, que resulta dificultoso conservar, considerando además que las obras de mitigación resultan una inversión muy elevada.

5. Agradecimientos.

Los autores agradecen a Dirección de Planeamiento, Dirección de Vialidad y Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas (MOP), Región del Maule, por su apoyo en trabajo de campo y equipos para el levantamiento de información. Además, se agradece a la Mesa de trabajo de riesgos naturales MOP, por la gestión y difusión de estos procesos que afectan a nuestra

infraestructura.

6. Referencias.

- Becerra, C. (2006). Análisis de riesgo natural por remociones en masa, carretera El Cobre, División El Teniente. Corporación Nacional del Cobre (CODELCO).
- Becerra, C., & De Rurange, J. (2018). Modelo de susceptibilidad a procesos de remociones en masa en rutas cordilleranas de Chile Central: Ruta 115 CH, Paso Pehuenche, Región del Maule. *Investigaciones Geográficas*, 55, 89-110. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2018.50799>
- Becerra, C., & De Rurange, J. (2021). Análisis de deslizamiento mediante técnicas UAV y LIDAR en Ruta 115 CH, Paso Pehuenche, Sector Monjes Blancos, Región del Maule, Chile. *Investigaciones Geográficas*, (61), 87-98. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2021.59646>
- Bonachea J. (2006). Desarrollo, aplicación y validación de procedimientos y modelos para la evaluación de amenazas, vulnerabilidad y riesgo debidos a procesos geomorfológicos. (Tesis para optar al grado de Doctor, Universidad de Cantabria, España). Recuperada de <https://www.tdx.cat/handle/10803/10610>
- Cruden, D. M. & Varnes, D.J. (1996). Landslide types and processes. En A.K. Turner & R.Schuster (Eds.), *Landslides, investigation and mitigation*, Special report 247 (pp. 36-75). Transportation Research Board.
- Doshida S. (2021). Evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos de tierra secundarios para la actividad de rescate utilizando datos LiDAR UAV. En F. Guzzetti, S. Mihalić Arbanas, P. Reichenbach, K. Sassa, P.T. Bobrowsky, & K. Takara (Eds.), *Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk*. WLF 2020. Contribución de ICL a la reducción del riesgo de desastres por deslizamientos de tierra. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-60227-7_31
- Dragičević, S., Lai, T., & Balram, S. (2015). GIS-based multicriteria evaluation with multiscale analysis to characterize urban landslide susceptibility in data-scarce environments. *Habitat international*, 45, 114- 125. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2014.06.031>
- Felicísimo, A. (1994). Modelos Digitales de Terreno. Introducción y aplicación en las ciencias ambientales. <http://www6.uniovi.es/~feli/pdf/libromdt.pdf>
- Fernández, F., Notti, D., Galve, J. P., Pérez, J. V., Azañón, J. M., Mateos, R. M., & Gómez-López, J. M. (2015). Técnicas remotas para el análisis multiescala y multitemporal de fenómenos superficiales. Una visión global del Cuaternario: el hombre como condicionante de procesos geológicos.

- Golovko, D. (2018). Spatio-temporal analysis of landslide hazard in Southern Kyrgyzstan using GIS and remote sensing data. PhD Thesis, Technische Universität, Berlin.
- Hamza, T., & Raghuvanshi, T. K. (2017). GIS based landslide hazard evaluation and zonation—a case from Jeldu District, central Ethiopia. *Journal of King Saud University-Science*, 29(2), 151-165. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2016.05.002>
- Hauser, A. (1994). Remociones en masa en Chile (mass wasting in Chile). *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*, 31(3), 159. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(94\)90783-8](https://doi.org/10.1016/0148-9062(94)90783-8)
- Jaboyedoff, M., Abellán, A., Carrea, D., Derron, M. H., Matasci, B., & Michoud, C. (2018). Mapping and Monitoring of Landslides Using LIDAR. *Natural Hazards: Earthquakes, Volcanoes, and Landslides*. CRC Press Taylor & Francis Group.
- Pellicani, R.; Argentiero, I.; Manzari, P.; Spilotro, G.; Marzo, C.; Ermini, R.; Apollonio, C. (2019). UAV and Airborne LiDAR Data for Interpreting Kinematic Evolution of Landslide Movements: The Case Study of the Montescaglioso Landslide (Southern Italy). *Geociencias*, 9(6), 248. <https://doi.org/10.3390/geosciences9060248>
- Santacana, N., Baeza, B., Corominas, J., De Paz, A., & Marturiá, J. (2003). A GIS- based multivariate statistical analysis for shallow landslide susceptibility mapping in La Pobla de Lillet area (Eastern Pyrenees, Spain). *Natural hazards*, 30(3), 281-295. <https://doi.org/10.1023/B:NHAZ.0000007169.28860.80>
- Wang, J. & Peng, X. (2009). GIS-base Od landslide hazard zonation model and its application. *Procedia earth and planetary science*, 1(1), 1.198-1.204. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2009.09.184>
- Zhao, F., Mallorqui, J., Iglesias, R., Gili, J., Corominas, J. (2018). Monitoreo de deslizamientos de tierra mediante interferometría SAR multitemporal con métodos avanzados de identificación de dispersores persistentes e imágenes TerraSAR-X de resolución espacial súper alta. *Remote Sensing*, 10(6), 921. <https://doi.org/10.3390/rs100609>