

DETERMINACIÓN DE ZONAS DE AMENAZA VOLCÁNICA EN EL COMPLEJO VOLCÁNICO NEVADOS DE CHILLÁN MEDIANTE MODELACIÓN NUMÉRICA. DETERMINATION OF VOLCANIC HAZARDS ZONES IN THE NEVADOS DE CHILLÁN VOLCANIC COMPLEX THROUGH NUMERICAL MODELING.

Esteban Ismael Barra Pradenas^{1*}

RESUMEN

Las erupciones volcánicas representan uno de los fenómenos naturales de mayor complejidad e impacto en el territorio chileno, debido a su capacidad de afectar ecosistemas, infraestructura y comunidades cercanas. Diversos estudios han destacado la importancia de utilizar herramientas de modelación numérica y análisis geoespacial para comprender y anticipar amenazas como la dispersión de cenizas y los deslizamientos en zonas volcánicas activas. En Chile, estas metodologías han adquirido especial relevancia como apoyo a la gestión del riesgo y a la planificación territorial.

En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo determinar zonas potencialmente amenazadas por caída de cenizas y deslizamientos en el Complejo Volcánico Nevados de Chillán, mediante el uso de herramientas numéricas y geoespaciales de libre acceso. Para ello, la dispersión de cenizas fue simulada utilizando el modelo Ash3D, que permite representar el transporte y la deposición de material volcánico considerando parámetros eruptivos, condiciones meteorológicas y características topográficas. Por otra parte, la susceptibilidad a deslizamientos fue evaluada mediante el modelo SHALSTAB, el cual integra variables hidrológicas y geomorfológicas para identificar áreas potencialmente inestables frente a eventos eruptivos o precipitaciones intensas.

Los resultados permitieron identificar y delimitar sectores con mayor exposición a caída de cenizas y alta susceptibilidad a deslizamientos, destacando áreas próximas a infraestructura turística, vías de acceso y zonas de interés territorial. La integración de ambos modelos permitió reconocer sectores donde convergen múltiples amenazas volcánicas, proporcionando información espacial relevante para el análisis y la gestión del riesgo. En conjunto, el enfoque desarrollado constituye una herramienta útil para fortalecer la planificación territorial y apoyar la gestión preventiva frente a futuras erupciones volcánicas.

Palabras clave: Cenizas, Deslizamientos, modelación numérica, Volcán, Amenaza.

ABSTRACT

Volcanic eruptions represent one of the most complex and impactful natural phenomena in Chilean territory due to their capacity to affect ecosystems, infrastructure, and nearby communities. Numerous studies have highlighted the importance of using numerical modeling and geospatial analysis tools to understand and anticipate hazards such as ash dispersion and landslides in active volcanic areas. In Chile, these methodologies have gained particular relevance as support tools for risk management and territorial planning. In this context, the present study aims to identify areas potentially threatened by ashfall and landslides in the Nevados de Chillán Volcanic Complex through the application of open-access numerical and geospatial tools. Ash dispersion was simulated using the Ash3D model, which represents the transport and deposition of volcanic material by considering eruptive parameters, meteorological conditions, and topographic characteristics. In parallel, landslide susceptibility was assessed using the SHALSTAB model, which integrates hydrological and geomorphological variables to identify potentially unstable areas under eruptive events or intense rainfall conditions.

The results made it possible to identify and delineate sectors with greater exposure to ashfall and high landslide susceptibility, highlighting areas located near tourist infrastructure, access routes, and zones of territorial interest. The integration of both models enabled the recognition of areas where multiple volcanic hazards converge, providing spatially explicit information relevant for hazard assessment and risk management. Overall, the proposed approach constitutes a useful tool for strengthening territorial planning and supporting preventive management strategies in the face of future volcanic eruptions.

Keywords: Ash, Landslides, Numerical Modeling, Volcano, Hazard.

¹ Servicio Aerofotogramétrico

* Autor de Correspondencia: esteban.barra@saf.cl

1. INTRODUCCIÓN

Las erupciones volcánicas son una expresión visible y poderosa de la dinámica interna de la Tierra. Más allá de su espectacularidad, constituyen procesos naturales capaces de generar impactos ambientales, sociales y económicos de gran magnitud. La caída de cenizas, los flujos piroclásticos, los lahares, las coladas de lava, la lluvia ácida y las explosiones volcánicas pueden afectar gravemente la seguridad de las personas y comprometer infraestructuras críticas como redes de agua potable, energía, transporte y telecomunicaciones (Acosta & Martínez, 2010; Yongliang et al., 2008). En las últimas décadas, el crecimiento de centros poblados en zonas próximas a volcanes activos ha incrementado significativamente la exposición y vulnerabilidad frente a estos fenómenos. La localización de comunidades en sectores a sotavento de posibles columnas eruptivas, o en valles que actúan como corredores naturales para lahares y flujos de detritos, eleva el riesgo territorial (Geoffroy & Ciocca, 2023; Pavón et al., 2019). A ello se suman limitaciones estructurales en edificaciones que no siempre están diseñadas para soportar acumulaciones de ceniza, lo que amplifica los daños incluso a grandes distancias del centro eruptivo (Torres et al., 2017). La ausencia o desactualización de planes de evacuación y sistemas de alerta temprana eficaces profundiza esta condición de vulnerabilidad. En este contexto, la literatura especializada coincide en que la reducción del riesgo volcánico requiere un enfoque integral que articule intervenciones estructurales, educación comunitaria, monitoreo permanente, planificación territorial y estrategias de preparación ante emergencias (Delegación Presidencial Regional de Ñuble, 2022). Esta necesidad adquiere especial relevancia en Chile, país emplazado en el margen activo del Cinturón de Fuego del Pacífico, donde convergen múltiples amenazas naturales como terremotos, tsunamis, inundaciones, remociones en masa y erupciones volcánicas.

Un caso emblemático de esta realidad es el Complejo Volcánico Nevados de Chillán (CVNCh), ubicado en el sur de Chile, en la Región de Ñuble, abarcando las provincias de Diguillín y Punilla dentro de la comuna de Pinto. Sus coordenadas geográficas son 36°52'S – 71°22'O (Sellés et al., 2004), y alcanza una altitud máxima de 3.216 m s.n.m. Con un diámetro basal aproximado de 13,8 km, un área basal cercana a 14 km² y un volumen estimado de 148 km³, el CVNCh se clasifica como un estratovolcán de gran extensión en la Cordillera de los Andes (Dixon et al., 1999) (Figura 1).



Revista Geográfica de Chile Terra Australis, Vol. 62 N°1 (2026) 2-21 ISSN 0719-9562

Nota: Autorizada su circulación, en cuanto a los mapas y citas que contiene esta obra, referente o relacionadas con los límites internacionales y fronteras del territorio nacional por Resolución Exenta N° 69, de Santiago, 29 de mayo de 2026, de la Dirección Nacional de Fronteras y Límites del Estado.

Figura 1: Área de estudio. Fuente: Elaboración propia, 2026.

Geomorfológicamente, el CVNCh presenta una configuración elongada y está compuesto principalmente por rocas andesíticas y dacíticas asociadas a distintos centros eruptivos del complejo volcánico (Dixon et al., 1999). Su entorno se caracteriza por pendientes abruptas, profundos valles fluviales y una importante actividad hidrotermal, especialmente en el sector de Termas de Chillán. Además, las condiciones climáticas de montaña, con precipitaciones concentradas durante otoño e invierno, favorecen la acumulación de nieve y la saturación de los suelos, incrementando la susceptibilidad a procesos de remoción en masa y deslizamientos en sectores de alta pendiente (Araya, 2014). La interacción entre topografía, litología y régimen hídrico configura un escenario naturalmente susceptible a procesos de inestabilidad de ladera, particularmente bajo condiciones de actividad eruptiva o precipitaciones intensas.

Los asentamientos humanos más próximos se localizan mayoritariamente al oeste del complejo, donde también se emplazan importantes atractivos turísticos como los centros de esquí Nevados de Chillán y Las Termas de Chillán. Esta coexistencia entre comunidades permanentes e intensa actividad turística incrementa la exposición y, por ende, la vulnerabilidad frente a eventuales procesos eruptivos. Desde el punto de vista eruptivo, el CVNCh es considerado uno de los sistemas volcánicos más activos de los Andes del Sur. Su registro geológico se remonta a aproximadamente 650.000 años (Figura 2).



Figura 2. Ciclo eruptivo a 9 años. Fuente: Elaboración propia, 2026.

Estudios morfoestructurales han permitido distinguir dos grandes unidades: el Subcomplejo Cerro Blanco y el Subcomplejo Las Termas (Orozco et al., 2016). Esta división refleja diferencias litológicas y variaciones en los estilos eruptivos dominantes a lo largo del tiempo.

La actividad reciente se ha concentrado principalmente en el Subcomplejo Las Termas, donde se han registrado tanto eventos de baja magnitud —como la emisión de lava Sebastián en 2008 o la explosión freática del cráter Chudcún en 2003— como procesos eruptivos de mayor duración e impacto regional. Entre los episodios históricos destacan la actividad del volcán Santa Gertrudis (1861–1865), la formación del volcán Nuevo (1906–1948) y la del volcán Arrau (1973–1986). Desde 2016, el complejo mantiene un ciclo eruptivo activo asociado a la apertura del cráter Nicanor, evidenciando la dinámica constructiva y destructiva característica del sistema.

Determinación De Zonas De Amenaza Volcánica En El Complejo Volcánico Nevados De Chillán Mediante Modelación Numérica.

Durante este ciclo eruptivo se emitieron 435 reportes de Actividad Volcánica Especial (REAV), se liberaron aproximadamente 580.000 toneladas de dióxido de azufre (SO_2) a la atmósfera y se observó la formación y destrucción de cuatro domos dentro del cráter, procesos que finalmente configuraron el actual cráter Nicanor. No obstante, entre todos los eventos documentados, destaca uno de escala mayor ocurrido hace aproximadamente 40.000 años, cuando una erupción explosiva generó el colapso de una caldera de más de 10 km de diámetro y un flujo piroclástico estimado en 150 km^3 , cuyo alcance se extendió hasta el valle central de la actual Región de Ñuble (Orozco et al., 2016). Este episodio es reconocido como uno de los más significativos de los Andes del Sur en términos de magnitud e impacto potencial.

Actualmente, el CVNCh está conformado por más de veinte centros volcánicos que abarcan una superficie cercana a 150 km^2 . La presencia de glaciares y nieves estacionales, que alimentan sistemas hídricos como el estero Renegado y los ríos Ñuble, Chillán y Diguillín (Caro, 2014), evidencia la estrecha interacción entre volcanismo, hidrología y criósfera. Esta interacción no solo define la identidad geomorfológica del complejo, sino que también incrementa la complejidad de los escenarios de amenaza, especialmente en lo que respecta a la generación de lahares y procesos de remoción en masa.

En este marco, la presente investigación propone una aproximación integrada para la evaluación de amenazas volcánicas en el CVNCh, considerando la dispersión de cenizas y la susceptibilidad a deslizamientos como procesos complementarios dentro de la dinámica territorial. Para ello, se busca, en primer término, caracterizar el contexto geológico, geomorfológico e hidrometeorológico del complejo, identificando los factores físicos que condicionan tanto la distribución espacial de depósitos de ceniza como la inestabilidad de laderas en escenarios de actividad eruptiva y precipitaciones intensas.

Sobre esta base, la investigación incorpora la simulación de escenarios eruptivos mediante el modelo numérico Ash3D, utilizando parámetros eruptivos representativos y condiciones meteorológicas plausibles con el fin de estimar patrones de dispersión y acumulación de cenizas en el entorno regional. De manera complementaria, se evalúa la susceptibilidad a deslizamientos superficiales a través del modelo SHALSTAB, integrando variables topográficas, geológicas e hidrológicas derivadas de información geoespacial disponible, con el propósito de identificar sectores potencialmente críticos frente a la combinación de factores volcánicos y climáticos.

Posteriormente, los resultados de ambos modelos son integrados en un análisis territorial conjunto que permite reconocer áreas donde convergen múltiples amenazas, especialmente en sectores próximos a asentamientos humanos, infraestructura turística y sistemas hídricos estratégicos. Esta integración no solo posibilita una lectura espacial más completa del riesgo, sino que también facilita la generación de cartografía temática orientada a la planificación y gestión del territorio.

El propósito central de esta investigación es identificar y delimitar zonas potencialmente amenazadas por caída de cenizas y deslizamientos en el Complejo Volcánico Nevados de Chillán mediante la integración de modelos numéricos y herramientas geoespaciales. Esta aproximación busca generar información espacial que contribuya a la comprensión de las amenazas volcánicas y apoye procesos de planificación territorial y gestión del riesgo en áreas expuestas a actividad eruptiva. Asimismo, se busca ofrecer una referencia metodológica replicable en otros sistemas volcánicos activos de la Cordillera de los Andes, integrando modelación numérica, análisis geoespacial y enfoque territorial como base para una gestión del riesgo más resiliente y científicamente fundamentada.

2. METODOLOGÍA Y CONFIGURACIÓN DE MODELOS.

La metodología aplicada combina enfoques numéricos y análisis geoespaciales para caracterizar las principales amenazas del CVNCh. Se integraron dos modelos utilizados en el ámbito científico: Ash3D, para la simulación de la dispersión y deposición de cenizas, y SHALSTAB, para la evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos. Ambos modelos se ejecutaron y analizaron en un entorno de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

2.1. Modelo de dispersión de cenizas: Ash3D.

Para el desarrollo de las simulaciones se utilizó el modelo Ash3D, un sistema tridimensional diseñado para representar el transporte atmosférico y la deposición de cenizas volcánicas posteriores a una erupción explosiva (Mastin et al., 2014; Schwaiger et al., 2012). Este modelo divide la atmósfera en una malla tridimensional de celdas, en la cual se calcula, de manera secuencial, el flujo de masa entre sus caras a lo largo del tiempo.

A diferencia de otros modelos orientados a describir la dinámica interna de la columna eruptiva, Ash3D no simula de forma explícita el ascenso del penacho volcánico. En su lugar, inyecta directamente partículas de ceniza en una columna vertical de celdas sobre el volcán, aplicando la ecuación empírica de Suzuki (1983) como distribución de masa. Esta simplificación —constante en el tiempo y uniforme en cuanto a granulometría— permite obtener resultados operativos en plazos reducidos, manteniendo un equilibrio entre eficiencia computacional y realismo físico.

Durante la simulación, la advección de las cenizas se calcula en función de campos de viento tridimensionales, los cuales varían temporalmente. Este proceso se complementa con mecanismos de difusión atmosférica (mezcla turbulenta) y sedimentación gravitacional, lo que permite trazar la trayectoria y destino de partículas de distinto tamaño. Para representar condiciones atmosféricas realistas, Ash3D integra bases de datos meteorológicas globales: (i) el Sistema de Pronóstico Global (GFS) de la NOAA, con resolución de 0,5°, cuando las erupciones simuladas corresponden a fechas recientes; y (ii) el reanálisis NCEP/NCAR de 2,5° de resolución para escenarios retrospectivos o superiores a dos semanas previas (Kalnay et al., 1996; NCEP, 2021).

La deposición de partículas se determina al cruzar el nivel que representa la superficie terrestre (nivel medio del mar), acumulándose por tamaño de grano en cada celda. A partir de ello, el modelo genera mapas de depósito que resultan útiles en la estimación de impactos, la planificación de respuestas de emergencia y el análisis retrospectivo de erupciones históricas.

Los resultados se exportaron en distintos formatos: (i) archivos .kmz para Google Earth, que permiten una visualización accesible y rápida; (ii) archivos espaciales en formato shapefile, compatibles con software SIG como ArcMap® o QGIS; y (iii) archivos ASCII cuadrículados, que contienen variables clave como el espesor de la ceniza depositada y el tiempo estimado de arribo de la nube volcánica a lugares de interés estratégico. Esta diversidad de salidas facilita tanto la integración en plataformas técnicas como su interpretación en contextos operativos.

Adicionalmente, la versión web de Ash3D se encuentra optimizada para la respuesta rápida en emergencias volcánicas, permitiendo ingresar parámetros esenciales —volcán, altura de columna, hora de inicio, duración, volumen erupcionado y extensión temporal de la simulación— y obtener resultados en menos de 10 minutos (Mastin et al., 2021). Esta capacidad convierte al modelo en una herramienta de gran valor para la toma de decisiones en tiempo real.

Para la investigación, se configuraron las simulaciones de acuerdo con los parámetros resumidos en la Tabla 2, con el objetivo de generar los mapas de depósito acumulado en superficie y de concentración de ceniza en la atmósfera, los cuales fueron procesados en un entorno SIG.

Tabla 2. Parámetros. Fuente: Elaboración propia, 2026.

Escenario	Altura de la pluma (Km)	Volumen de ceniza (km³)	Duración de la erupción (Horas)	Datos Meteorológicos del sistema GFS	Modelo Digital de Elevación.	Granulometría
-----------	-------------------------	-------------------------	---------------------------------	--------------------------------------	------------------------------	---------------

Determinación De Zonas De Amenaza Volcánica En El Complejo
Volcánico Nevados De Chillán Mediante Modelación Numérica.

Nevados de Chillán	8.21	0.003	06:00	Resolución Espacial de 0,5°	30 m de resolución.	Entre 1 μ m y 2 mm.
--------------------	------	-------	-------	-----------------------------	---------------------	-------------------------

2.2. Modelo de susceptibilidad a deslizamientos: SHALSTAB.

El modelo SHALSTAB (*Shallow Stability Model*), desarrollado por Dietrich & Montgomery, (1998), combina los principios hidrológicos de saturación de suelos con la estabilidad de taludes para determinar la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos superficiales. Este modelo considera que los deslizamientos se activan cuando la presión de poros excede la resistencia del suelo, lo cual depende del balance entre el flujo subsuperficial y a la geometría del terreno. Para ello, SHALSTAB combina variables topográficas, hidrológicas y geotécnicas derivadas de un Modelo Digital de Elevación (MDE). Por lo cual su uso resulta particularmente relevante en regiones montañosas, donde la saturación del suelo constituye uno de los principales detonantes de los movimientos en masa (Montgomery & Dietrich, 1994).

El modelo SHALSTAB se basa en dos relaciones principales:

Índice a/b: relación entre el área de contribución específica (a), y la pendiente del terreno (b). Este índice representa la capacidad de acumulación de agua en relación con la inclinación de la ladera, condicionando el potencial de saturación.

Índice q/t: relación entre la recarga hídrica (q) y el espesor del suelo (t). Este indicador estima la susceptibilidad del perfil edáfico a la pérdida de estabilidad frente a la infiltración y acumulación de agua.

Ambas relaciones permiten estimar el índice de estabilidad de cada celda del terreno. Para esta investigación se utilizó un MDE de 30 m, parámetros de densidad del suelo entre 1.500-1.800 kg/m³ y valores de ángulo de fricción entre 30° y 35°, calibrados con antecedentes geotécnicos regionales.

La investigación se enmarcó en un diseño cuantitativo, no experimental y de tipo predictivo, orientado a la construcción de escenarios de susceptibilidad espacial, combinando análisis topográfico, edáfico e hidrológico mediante técnicas de modelación en sistemas de información geográfica (SIG), con el objetivo de generar un producto cartográfico útil para la gestión del riesgo y la planificación territorial.

El procesamiento se realizó mediante herramientas de análisis hidrológico y raster en software SIG, generando un mapa de susceptibilidad que clasifica el territorio en cinco categorías: muy baja, baja, moderada, alta y muy alta.

Los mapas obtenidos constituyen una herramienta técnica y socialmente relevante, ya que permiten identificar sectores donde la saturación del suelo podría detonar procesos de inestabilidad. Este insumo no solo fortalece la comprensión científica de la dinámica geomorfológica local, sino que también ofrece soporte práctico para la gestión del riesgo natural, la prevención de desastres y la planificación territorial sostenible, contribuyendo a la protección de comunidades y actividades humanas en áreas vulnerables.

3. VARIABLES DE VULNERABILIDAD ANTE LA AMENAZA.

3.1. La Amenaza de una Actividad Volcánica.

La amenaza se entiende como un peligro latente capaz de desencadenar una emergencia que, en ciertos casos, puede destruir o alterar significativamente un ecosistema y los elementos que lo integran. Esta alteración puede tener consecuencias directas sobre la vida humana o sus actividades, al punto de generar un desastre (CEPAL, 2005).

Desde una perspectiva más amplia, la amenaza se refiere a la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno, ya sea de origen natural o antrópico, con una determinada magnitud, que puede provocar efectos adversos sobre

Determinación De Zonas De Amenaza Volcánica En El Complejo Volcánico Nevados De Chillán Mediante Modelación Numérica.

las personas, comunidades, los sistemas productivos, infraestructura y otros componentes del territorio. Según lo expuesto por Foschiatti, (2004) la amenaza tiene tres componentes (Figura 3).

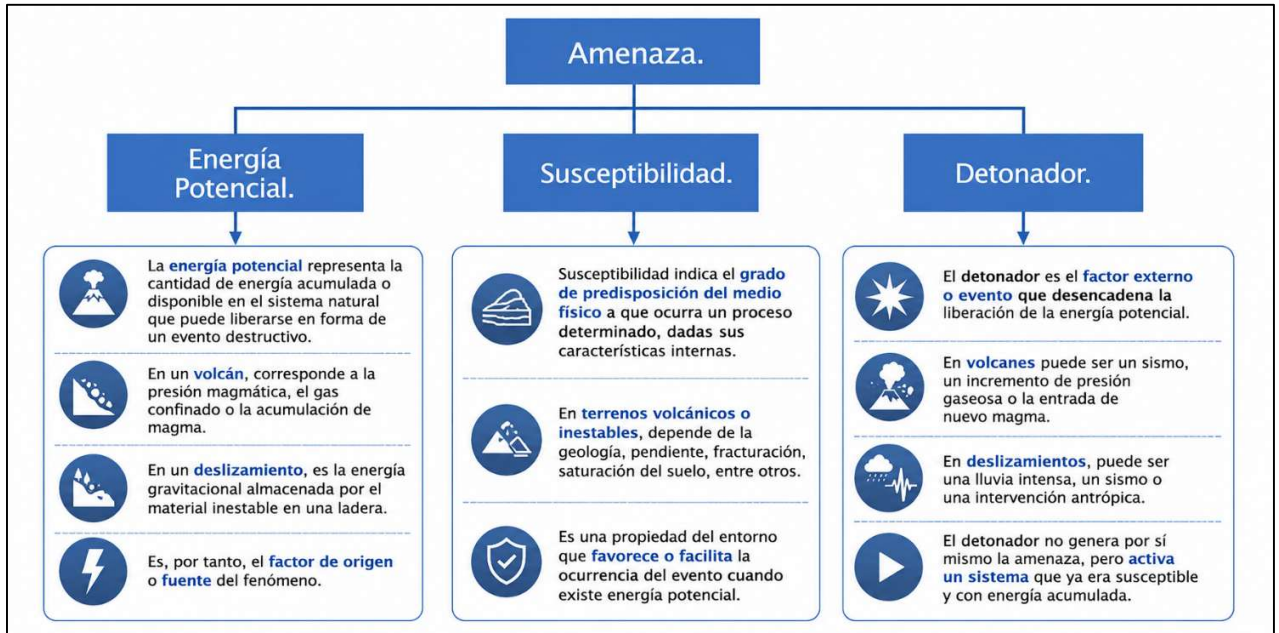


Figura 3: Componentes de la Amenaza. Fuente: Elaboración propia, 2026.

3.2. La Vulnerabilidad ante la Amenaza de Actividad Volcánica.

La vulnerabilidad se define como un factor interno de riesgo de una persona, comunidad o sistema expuesto a una amenaza. Esta se relaciona con su predisposición o capacidad intrínseca (de carácter social, político, económico, ambiental, entre otros) para ser afectado negativamente por un fenómeno, ya sea de origen natural o antrópico (OUM, 2011).

De acuerdo con Foschiatti (2004), la vulnerabilidad se subdivide en 5 componentes (Figura 4).

Determinación De Zonas De Amenaza Volcánica En El Complejo Volcánico Nevados De Chillán Mediante Modelación Numérica.



Figura 4: Componentes de Vulnerabilidad ante una Amenaza. Fuente: Elaboración propia, 2026.

La Tabla 3 resume lo descrito sobre la amenaza y vulnerabilidad ante la actividad del volcán.

Tabla 3. Componentes del Riesgo de Desastre. Fuente: Elaboración propia, 2026.

Riesgo de desastre: <i>Actividad Volcánica Complejo Nevados de Chillan.</i>	Amenaza: <i>Lahar, Caída de Cenizas y Flujo Piroclástico.</i>	Energía Potencial: <i>Desplazamiento de Lahares a gran velocidad.</i> Susceptibilidad: <i>Presencia de nieve en gran parte del año.</i> Detonador: <i>Aumento de población y edificaciones en zonas cercanas al Volcán o a los Lahares.</i>			
	Vulnerabilidad: <i>Social, Estructural, No Estructural, Funcional y Operativa, Sísmica.</i>	Grado de exposición: <i>Dependerá del tiempo de actividad del Volcán, pueden ser horas, días, hasta meses o años.</i>			
		Protección: <i>Estructuras adecuadas, defensas del ecosistema.</i>	Homeostasis: <i>Capacidad de no verse afectado.</i>	Resistencia: <i>Capacidad de resistir y superar la crisis.</i>	
		Reacción inmediata: <i>Reaccionar, protegerse y evitar la exposición.</i>	Resiliencia: <i>Capacidad de recuperación.</i>		
		Recuperación básica: <i>Restablecimiento de Habitabilidad, Servicios Básicos o de Salud.</i>	Reconstrucción: <i>Recuperación y Condiciones normales, más renovadas y menos vulnerables.</i>		

4. RESULTADOS.

4.1. Dispersión de cenizas.

Los resultados obtenidos mediante el modelo Ash3D muestran que la dispersión de cenizas del CVNCh se orienta preferentemente hacia el este y sureste, siguiendo la dirección predominante de los vientos troposféricos. Las simulaciones revelan que la pluma eruptiva alcanza alturas superiores a los 10 km sobre el

Determinación De Zonas De Amenaza Volcánica En El Complejo Volcánico Nevados De Chillán Mediante Modelación Numérica.

nivel del mar, con concentraciones máximas de partículas finas dentro de los primeros 100 km del cráter. El depósito superficial se concentra principalmente en torno al edificio volcánico y disminuye progresivamente con la distancia. Las isolíneas de espesor indican acumulaciones cercanas a 10 cm en sectores proximales y valores inferiores a 1 mm en zonas más alejadas, incluso próximas a la frontera chileno-argentina. Este comportamiento concuerda con registros satelitales y reportes emitidos por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) durante los episodios eruptivos ocurridos entre el 2016 y 2021.

La Figura 5 presenta la distribución espacial del espesor de ceniza volcánica (tefra) depositada en superficie, expresada en milímetros. Se observa que las mayores acumulaciones se concentran en las cercanías del centro eruptivo, alcanzando valores superiores a los 7 mm, mientras que hacia sectores distales la carga disminuye progresivamente hasta valores cercanos a 0.01 mm. Esta representación permite dimensionar los posibles impactos sobre infraestructura, agricultura y ecosistemas, considerando que incluso depósitos delgados de ceniza pueden afectar sistemas de agua potable, generar pérdidas de productividad agrícola y alterar hábitats naturales. Además, la representación tridimensional facilita la comprensión espacial del alcance regional del depósito y mejora su interpretación en contextos científicos y operativos.

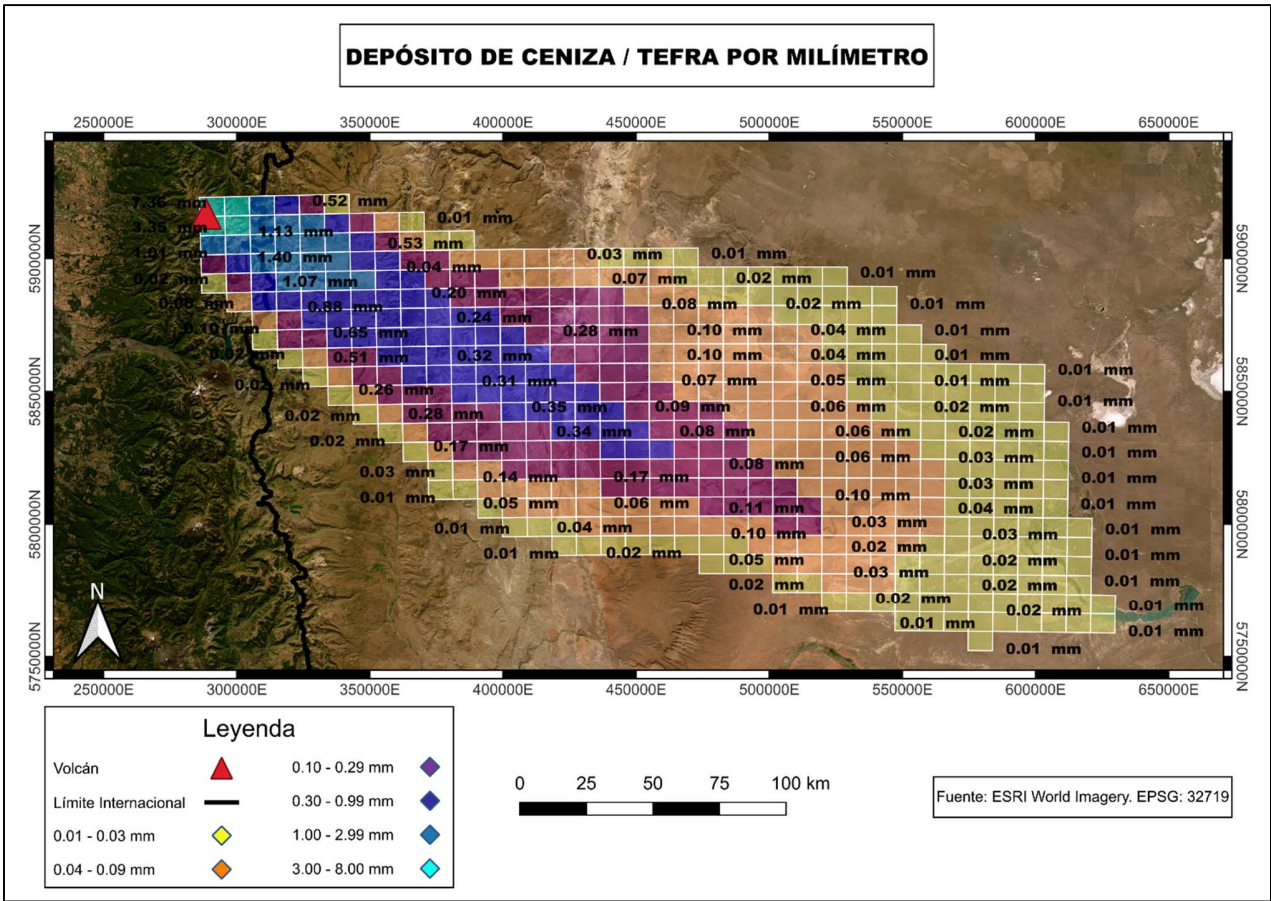


Figura 5: Depósito de ceniza/tefra expresado en milímetros. Fuente: Elaboración propia 2026.

La Figura 6 muestra el tiempo estimado de llegada y acumulación de ceniza en superficie, medido en horas desde el inicio de la erupción. Los resultados indican que las áreas más próximas al volcán reciben material en menos de una hora, mientras que sectores más alejados registran la llegada de ceniza después de más de 14 horas. Este comportamiento temporal resulta particularmente relevante para el diseño de alertas tempranas y planes de emergencia, ya que permite estimar el tiempo disponible para activar medidas preventivas y

Determinación De Zonas De Amenaza Volcánica En El Complejo Volcánico Nevados De Chillán Mediante Modelación Numérica.

coordinar evacuaciones en distintas localidades. Asimismo, entrega antecedentes sobre la velocidad de dispersión de la nube eruptiva y la influencia de la dinámica atmosférica en el transporte del material volcánico.

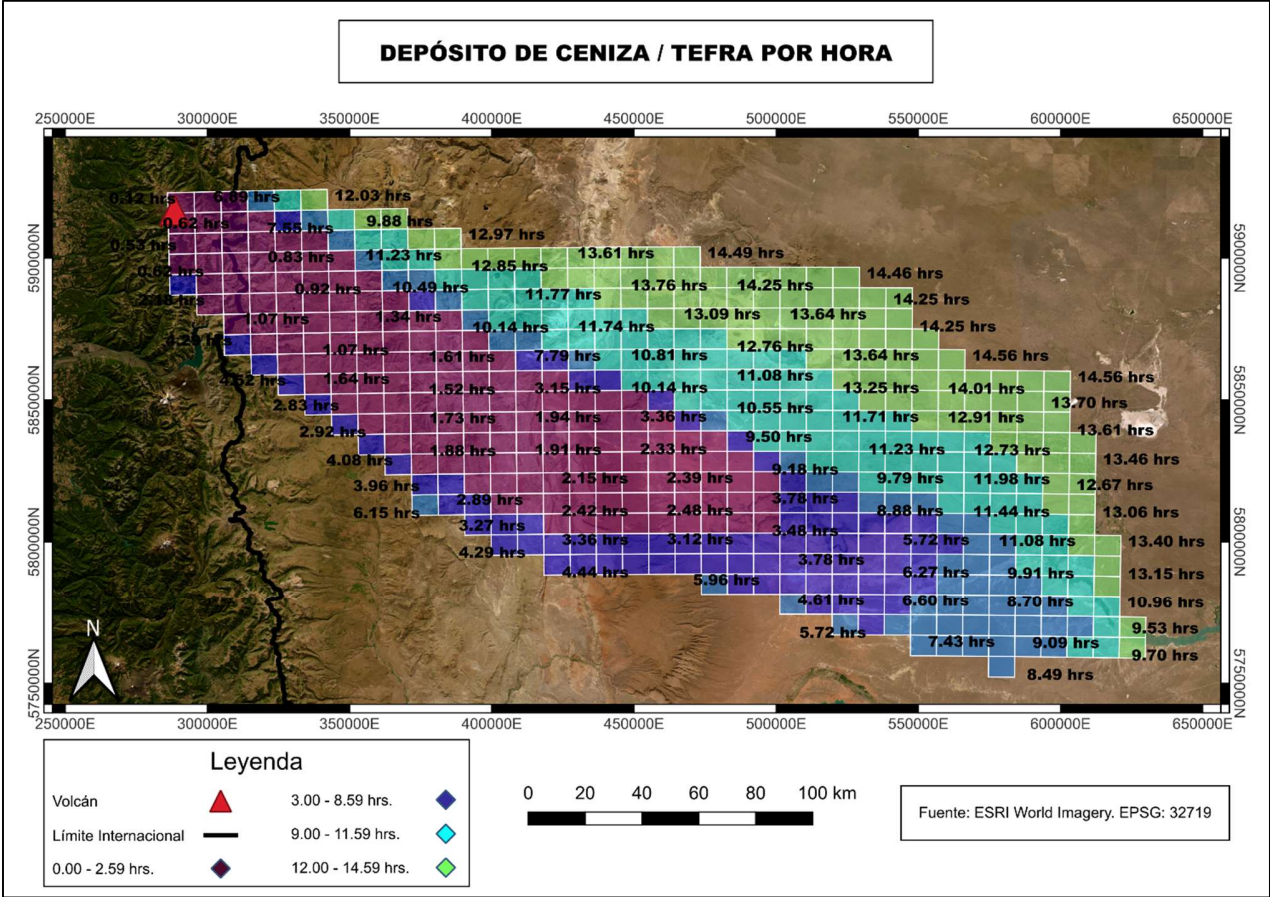


Figura 6: Depósito de ceniza/tefra por tiempo estimado de arribo. Fuente: Elaboración propia 2026.

Complementariamente, la Figura 7 representa la altura alcanzada por la pluma volcánica durante la simulación. Los resultados evidencian que el material expulsado asciende a distintos niveles atmosféricos, alcanzando alturas entre 1 y 10.5 km sobre el nivel del cráter. Las mayores alturas se concentran en sectores próximos al centro eruptivo y disminuyen progresivamente hacia el este, siguiendo la dirección predominante de los vientos. Esta distribución resulta especialmente relevante para la gestión del riesgo aeronáutico, ya que la presencia de cenizas en niveles medios y altos de la atmósfera representa una amenaza significativa para rutas aéreas regionales y operaciones aeronáuticas entre Concepción, Chillán y Neuquén, perteneciente a la República Argentina.

Determinación De Zonas De Amenaza Volcánica En El Complejo Volcánico Nevados De Chillán Mediante Modelación Numérica.

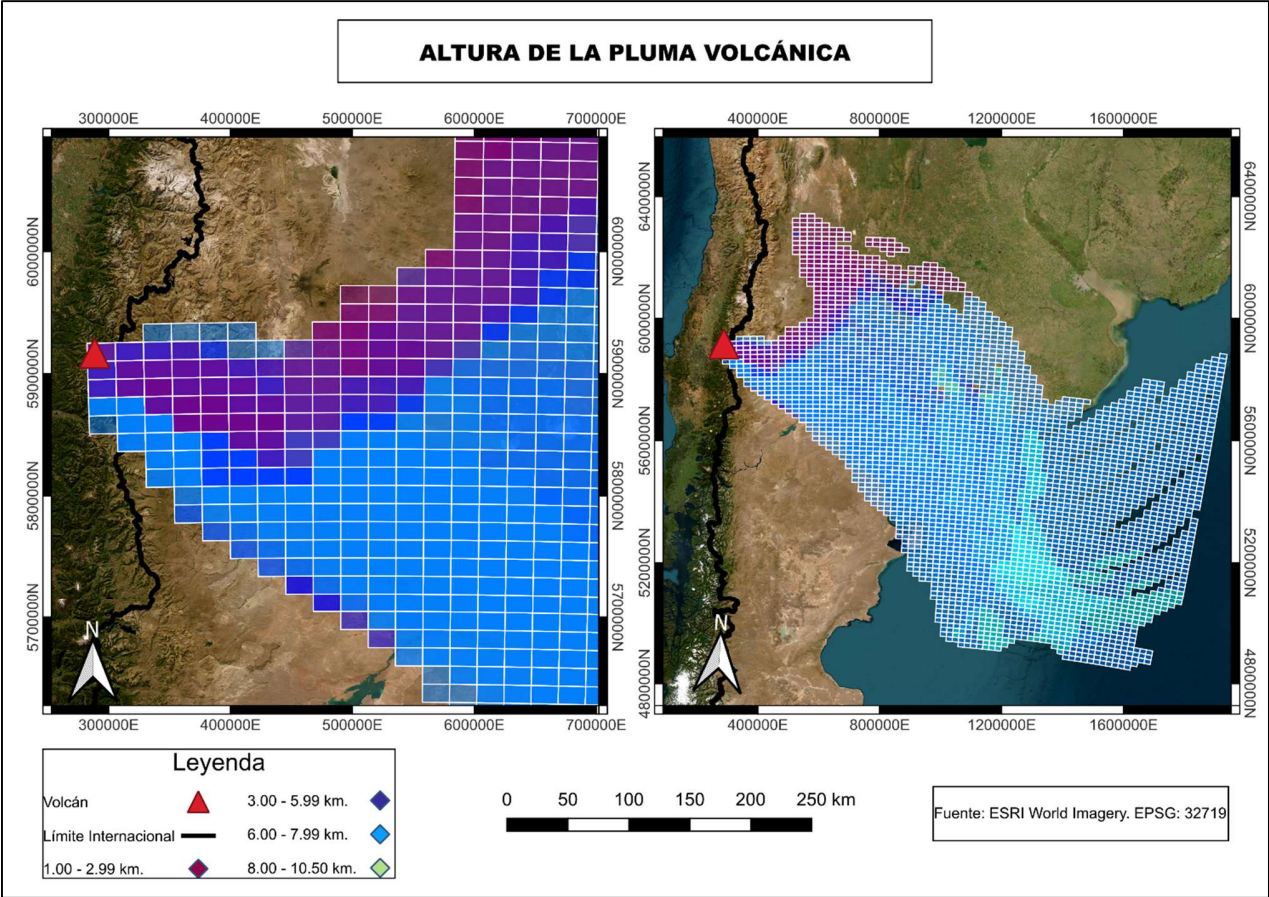


Figura 7: Altura de la pluma volcánica. Fuente: Elaboración propia 2026.

Por otra parte, la Figura 8 presenta la distribución espacial de la carga de material volcánico contenido en la nube eruptiva, expresada en toneladas por kilómetro cuadrado (T/km^2). Las mayores concentraciones de partículas se registran en las proximidades del volcán, disminuyendo progresivamente hacia el este en concordancia con el patrón de dispersión de la pluma. Esta información resulta relevante para estimar potenciales impactos sobre la salud, visibilidad, infraestructura y ecosistemas, considerando que mayores cargas de ceniza aumentan la probabilidad de colapso de techumbres, contaminación de fuentes de agua y afectación de motores y sistemas eléctricos.

Determinación De Zonas De Amenaza Volcánica En El Complejo Volcánico Nevados De Chillán Mediante Modelación Numérica.

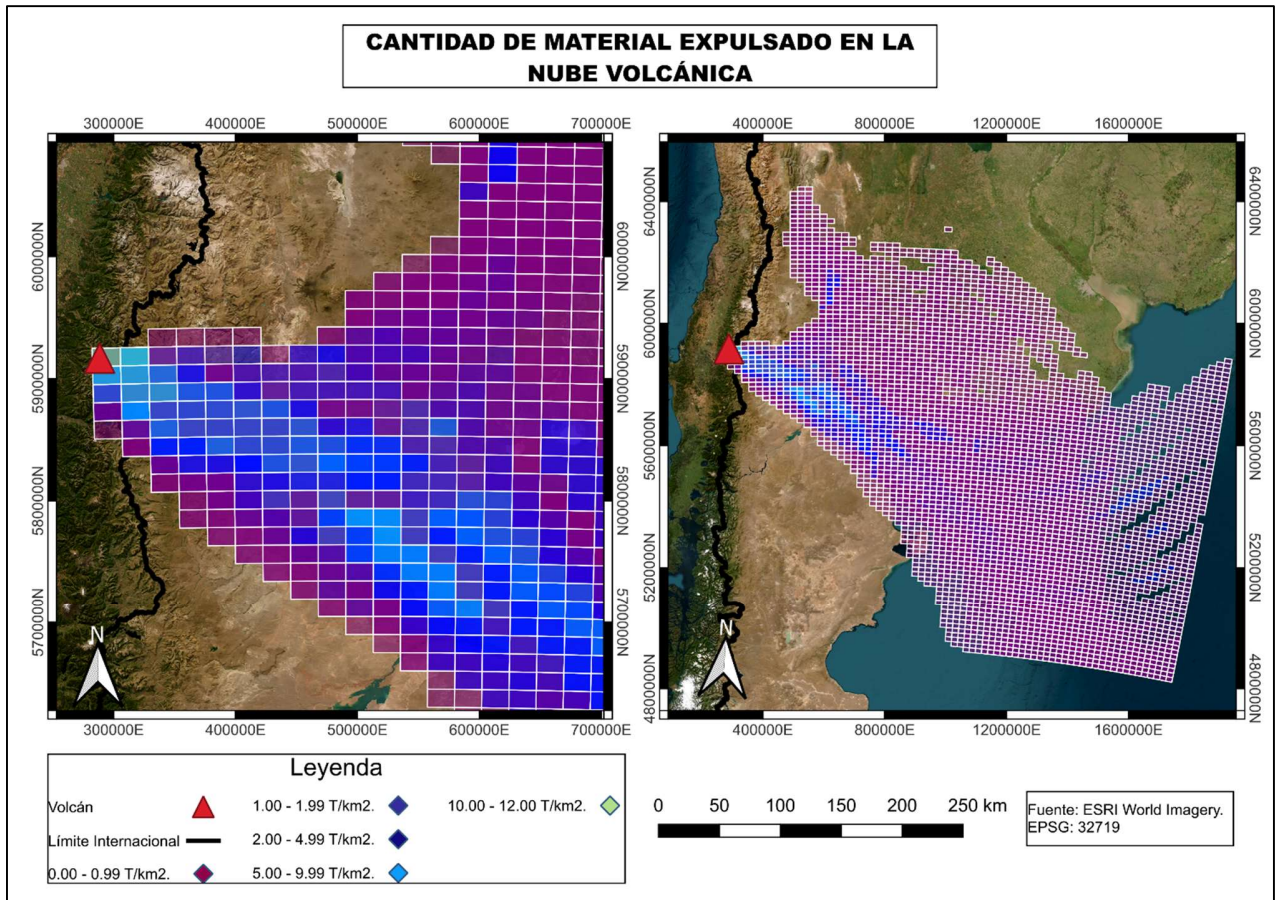


Figura 8: Cantidad material expulsado en la nube volcánica. Fuente: Elaboración propia 2026.

En conjunto, las Figuras 5, 6, 7 y 8 permiten comprender de manera integrada la dinámica eruptiva del CVNCh, considerando tanto el alcance espacial y temporal de la dispersión de cenizas como la magnitud del material transportado en la atmósfera. Los resultados evidencian que la nube volcánica podría afectar aproximadamente 25.000 km² en escenarios eruptivos moderados, destacando la afectación potencial sobre sectores turísticos y habitats cercanos a Termas de Chillán. Esta información constituye un insumo relevante para la planificación territorial, la protección civil y la gestión del riesgo volcánico, contribuyendo a reducir la exposición de la población y fortalecer la capacidad de respuesta frente a futuros eventos eruptivos.

4.2. Susceptibilidad a deslizamientos.

Los resultados obtenidos mediante el modelo SHALSTAB evidencian una alta heterogeneidad espacial en la susceptibilidad a deslizamientos dentro del área de estudio. Las zonas clasificadas con susceptibilidad alta y muy alta se concentran principalmente en las laderas occidentales del Complejo Volcánico Nevados de Chillán (CVNCh) y en sectores cercanos a quebradas y valles de montaña, donde las condiciones topográficas favorecen la acumulación de agua y la inestabilidad del terreno.

Las áreas más susceptibles coinciden con pendientes superiores a 35°, presencia de suelos poco consolidados y sectores afectados por intensa dinámica geomorfológica. Estas condiciones incrementan significativamente la probabilidad de deslizamientos, especialmente después de periodos de alta precipitación, acumulación de nieve o actividad volcánica reciente. En contraste, las zonas clasificadas con susceptibilidad baja y muy baja corresponden principalmente a valles amplios y sectores relativamente planos de origen glacial y fluvial, donde

Determinación De Zonas De Amenaza Volcánica En El Complejo Volcánico Nevados De Chillán Mediante Modelación Numérica.

el drenaje natural disminuye la saturación del suelo y favorece condiciones más estables.

La Figura 9 presenta el resultado del modelo a/b, el cual representa la relación entre el área de contribución hídrica y la pendiente del terreno. La distribución espacial muestra cómo el posible flujo de material tiende a concentrarse siguiendo la topografía natural, utilizando quebradas y cauces como corredores preferenciales de desplazamiento. La simbología altitudinal permite identificar claramente la trayectoria potencial de los flujos desde las zonas altas del edificio volcánico hacia sectores bajos de la cuenca.

El patrón observado evidencia que la energía gravitacional acumulada en las laderas es suficiente para movilizar importantes volúmenes de material pendiente abajo, alcanzando zonas de menor elevación. Este comportamiento resulta particularmente relevante para identificar áreas de exposición directa frente a procesos de remoción en masa y posibles flujos asociados a eventos eruptivos o precipitaciones extremas.

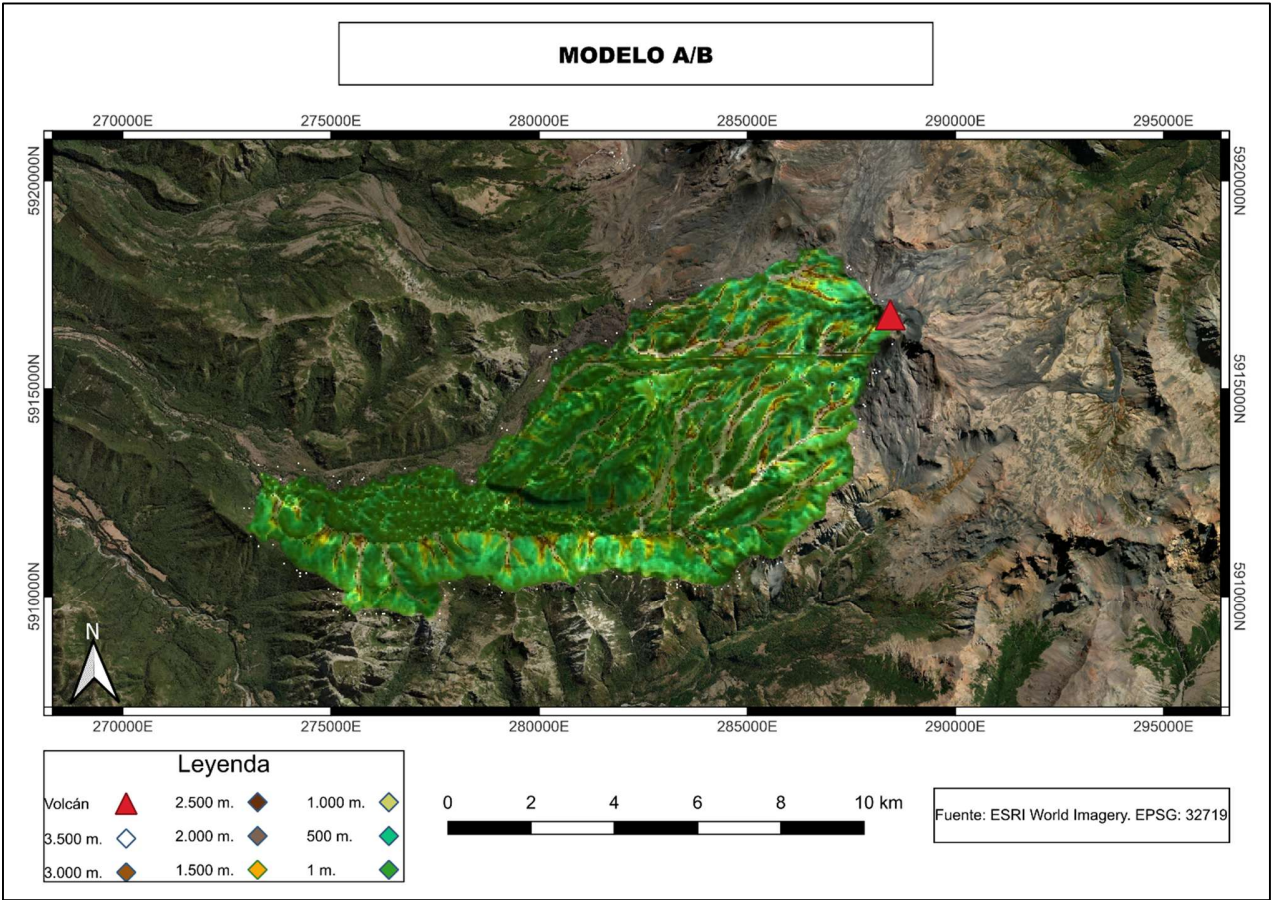


Figura 9: Modelo a/b de susceptibilidad y trayectoria potencial de flujo. Fuente: Elaboración propia, 2026.

Determinación De Zonas De Amenaza Volcánica En El Complejo Volcánico Nevados De Chillán Mediante Modelación Numérica.

Por otra parte, la Figura 10 corresponde al modelo q/t, el cual incorpora la estimación de acumulación y erosión potencial de material en el terreno. Los resultados muestran sectores con valores positivos asociados a acumulación de sedimentos y zonas con valores negativos vinculados a procesos erosivos y remoción de material.

Las mayores acumulaciones, con valores cercanos a 10 metros, se localizan principalmente en áreas de confinamiento topográfico y sectores bajos de quebradas, donde el material movilizado tiende a depositarse. En contraste, las áreas con valores negativos representan sectores de erosión activa y arrastre de material, lo que incrementa la movilidad de los flujos y su capacidad destructiva.

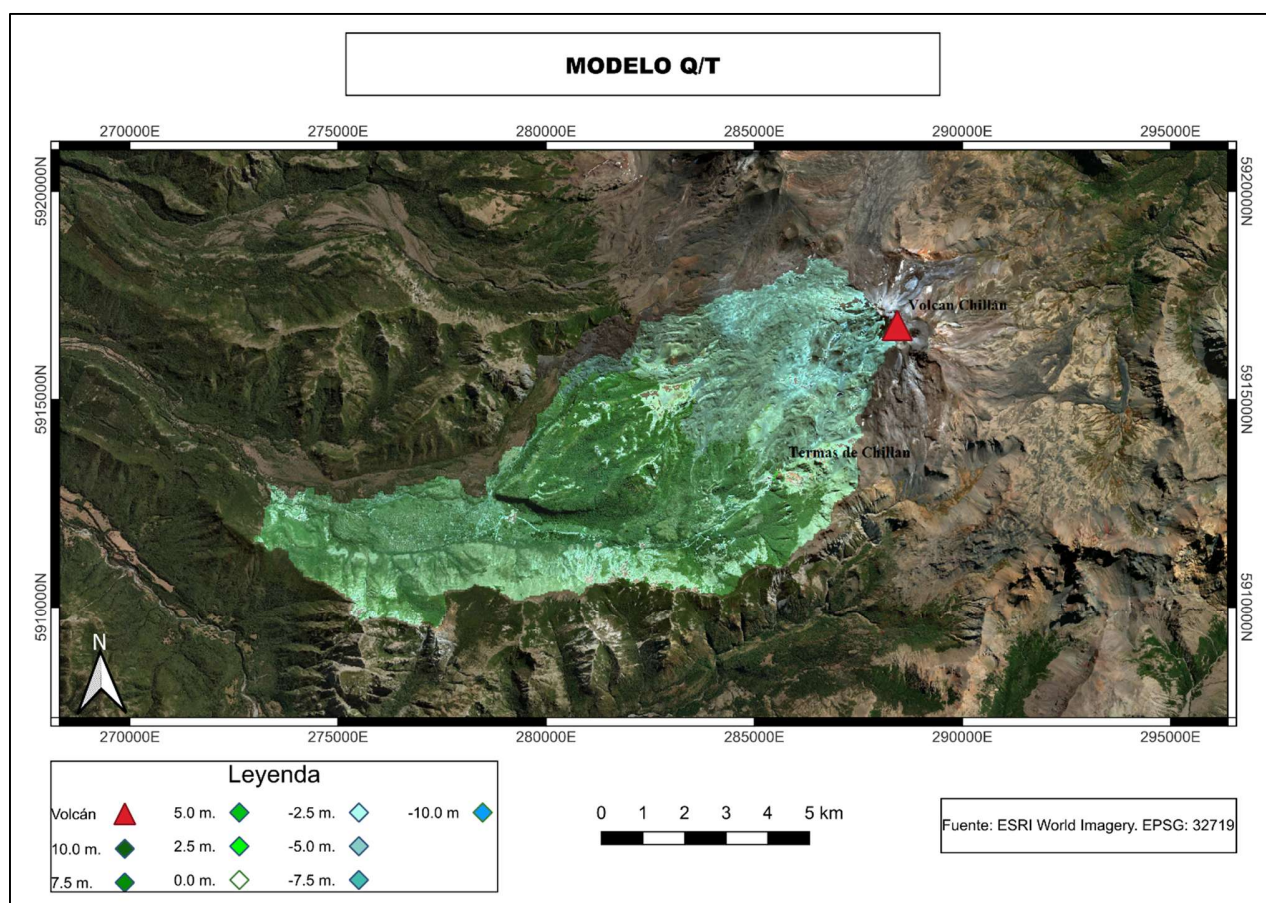


Figura 10: Modelo q/t de acumulación y erosión potencial de material. Fuente: Elaboración propia, 2026

El análisis espacial de coincidencia entre las zonas susceptibles y los elementos expuestos permitió identificar sectores donde infraestructura turística, caminos y áreas habitadas se superponen con escenarios de riesgo potencial. Destaca especialmente la afectación potencial sobre el sector de Termas de Chillán, lo cual evidencia la importancia de incorporar criterios de susceptibilidad en la planificación territorial y en la gestión preventiva de amenazas naturales.

En conjunto, los modelos a/b y q/t permiten comprender de manera integrada tanto la trayectoria potencial de los flujos como su capacidad de erosión y acumulación de material. Esta aproximación proporciona una visión más completa de la dinámica geomorfológica del entorno volcánico y constituye una herramienta relevante para la protección de infraestructura crítica, la planificación territorial y la toma de decisiones frente a

emergencias volcánicas y eventos hidrometeorológicos extremos.

4.3. Integración de resultados.

La integración de los resultados de ambos modelos permitió construir un mapa sintético de amenazas volcánicas compuestas, en el que se identificaron tres zonas prioritarias:

- Zona proximal de alta amenaza, que abarca el entorno inmediato del cráter activo, con acumulación significativa de cenizas y alta pendiente.
- Zona intermedia de riesgo combinado, donde la dispersión de cenizas y la susceptibilidad a deslizamientos coinciden espacialmente, afectando caminos, refugios y sectores turísticos.
- Zona distal de afectación aérea, correspondiente al corredor oriental de transporte de ceniza, con potencial impacto sobre operaciones aeronáuticas y ecosistemas de alta montaña.

La representación espacial de estos resultados ofrece una herramienta de análisis útil para las autoridades locales y regionales, facilitando la actualización de planes de emergencia, la definición de zonas de exclusión y la priorización de monitoreo en áreas críticas.

5. DISCUSIÓN.

Los resultados obtenidos a partir de los modelos Ash3D y SHALSTAB permiten comprender de manera integrada la dinámica eruptiva y la respuesta del territorio frente a los procesos de dispersión de cenizas y deslizamientos. Esta aproximación evidencia la necesidad de considerar las amenazas volcánicas no como fenómenos aislados, sino como componentes interdependientes dentro de un mismo sistema ambiental y social. Estos hallazgos son consistentes con investigaciones previas que destacan la alta exposición del territorio chileno a fenómenos volcánicos y la necesidad de abordarlos desde un enfoque integral de gestión del riesgo (Gill & Malamud, 2017; Geoffroy & Ciocca, 2023).

Las simulaciones de Ash3D reflejan con claridad la influencia de los vientos predominantes del oeste en la dispersión de material fino hacia el sector argentino. Esta dirección coincide con los registros históricos de erupciones del CVNCh, donde los depósitos de ceniza se han extendido más allá de la frontera (Mastin et al., 2014). De igual manera, la identificación de cargas de ceniza significativas en sectores cercanos y alejados confirma lo planteado por Torres et al. (2017), respecto a los daños estructurales que incluso depósitos relativamente delgados pueden generar en edificaciones no diseñadas para tales condiciones.

Desde una perspectiva operativa, estos resultados adquieren relevancia para la seguridad aeronáutica, ya que la presencia de partículas en suspensión puede afectar la visibilidad, los motores de las aeronaves y la planificación de rutas aéreas en la macrozona sur.

Asimismo, los mapas de espesor de ceniza ofrecen información útil para la protección de la infraestructura y los servicios básicos. En escenarios eruptivos moderados, la acumulación de algunos centímetros de ceniza puede alterar el funcionamiento de sistemas de agua potable, provocar daños en techumbres y generar impactos sobre la agricultura y la ganadería. Por ello, los resultados del modelo constituyen un insumo de valor para los planes de emergencia comunales y regionales.

Por otra parte, el análisis de susceptibilidad obtenido con SHALSTAB confirma que las condiciones topográficas y la saturación de suelos desempeñan un rol determinante en la estabilidad del terreno. Las zonas de alta pendiente, especialmente orientadas al oeste y suroeste, presentan una clara vulnerabilidad frente a precipitaciones intensas o actividad volcánica reciente (Dixon et al., 1999; Montgomery & Dietrich, 1994).

En este sentido, la coincidencia espacial entre áreas inestables y sectores habitados revela una problemática de planificación territorial. La expansión turística, sumada a la construcción de caminos y cabañas en zonas con pendientes críticas, incrementa la exposición y el riesgo asociado. Destaca especialmente la afectación potencial sobre el sector de Termas de Chillán, lo cual resalta la importancia de este tipo de análisis para la

Determinación De Zonas De Amenaza Volcánica En El Complejo Volcánico Nevados De Chillán Mediante Modelación Numérica.

gestión del riesgo en áreas turísticas y habitadas. Estos resultados sugieren la necesidad de actualizar los instrumentos de ordenamiento territorial e incorporar criterios de riesgo en la aprobación de proyectos de infraestructura.

La integración de los resultados permite avanzar hacia una comprensión más holística del riesgo volcánico. El enfoque adoptado demuestra que la combinación de modelos numéricos y herramientas SIG facilita la elaboración de mapas temáticos útiles para la toma de decisiones. Sin embargo, la modelación debe complementarse con información social y de vulnerabilidad estructural, de modo que los mapas de amenaza se transformen en herramientas efectivas de gestión.

Desde una perspectiva de gobernanza del riesgo, los hallazgos de este estudio refuerzan la importancia de mantener un monitoreo permanente del CVNCh y fortalecer la comunicación entre los organismos técnicos y las comunidades locales. El conocimiento del comportamiento eruptivo y de las condiciones del terreno puede traducirse en medidas preventivas concretas, como la delimitación de zonas seguras, el diseño de rutas de evacuación y la capacitación de la población.

No obstante, entre las limitaciones de la investigación se reconocen la resolución espacial de los modelos y la disponibilidad de datos locales sobre características del suelo y humedad. Asimismo, las simulaciones de ceniza se basan en escenarios eruptivos idealizados, lo que implica márgenes de incertidumbre en la estimación del depósito real.

A futuro, se recomienda incorporar modelos meteorológicos de mayor resolución, así como estudios de campo que permitan calibrar y validar los resultados. Del mismo modo, sería deseable integrar indicadores de vulnerabilidad social y económica, con el fin de construir un enfoque de riesgo verdaderamente integral.

En términos prácticos, la metodología aquí propuesta ofrece un marco replicable en otros volcanes activos de Chile y Sudamérica, contribuyendo al fortalecimiento de las capacidades de monitoreo y planificación en contextos de alta amenaza volcánica.

6. CONCLUSIONES.

La modelación numérica aplicada al CVNCh permitió integrar dos procesos fundamentales en la caracterización de amenazas volcánicas: la dispersión de cenizas y la susceptibilidad a deslizamientos. Los resultados confirman que el CVNCh constituye un sistema activo con alto potencial de impacto sobre la población y las actividades humanas en su entorno inmediato.

El modelo Ash3D evidenció la capacidad del material volcánico para dispersarse a grandes distancias, afectando zonas de importancia económica y turística, así como el tráfico aéreo regional. En tanto, SHALSTAB permitió identificar áreas críticas de inestabilidad de ladera, donde las pendientes pronunciadas y las características de los suelos incrementan el riesgo de deslizamientos.

La integración de ambos resultados ofrece una visión más completa del riesgo volcánico, permitiendo priorizar áreas de monitoreo y definir estrategias preventivas.

La investigación demostró que la integración de modelos numéricos de libre acceso y herramientas SIG constituye una metodología eficaz para la identificación y representación espacial de amenazas volcánicas. Los resultados permitieron delimitar áreas potencialmente expuestas a caída de cenizas y deslizamientos en el Complejo Volcánico Nevados de Chillán, generando información útil para el análisis territorial y la evaluación de escenarios de riesgo. Asimismo, la metodología propuesta puede ser aplicada en otros sistemas volcánicos activos, contribuyendo al desarrollo de estudios orientados a la gestión del riesgo y la planificación territorial. Si bien existen limitaciones asociadas a la resolución de los datos y la ausencia de calibración con eventos históricos, los resultados constituyen una base sólida para futuras investigaciones y la elaboración de mapas de riesgo actualizados.

Finalmente, se recomienda continuar desarrollando estudios complementarios que integren variables sociales,

económicas y ambientales, avanzando hacia una gestión del riesgo basada en evidencia y orientada a la resiliencia de las comunidades locales.

REFERENCIAS

Acosta, A., & Martínez, E. (Comps.). (2010). *Agua: un derecho fundamental* (1.^a ed.). Quito, Ecuador: Abya-Yala.

Araya Parra, S. L. (2014). *Análisis de susceptibilidad por remoción en masa en el valle Las Trancas y Termas de Chillán: Criterios para el manejo del riesgo* [Tesis de magíster, Universidad de Concepción]. [Repositorio Magíster Geografía UdeC](#)

Caro Paredes, D. (2014). *Estudios glaciológicos en los Nevados de Chillán*. Repositorio Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/116536>

CEPAL. (2005). *Elementos conceptuales para la prevención y reducción de daños originados por amenazas socio-naturales*. Santiago de Chile. <http://archivo.cepal.org/pdfs/Waterguide/lcg2272s.pdf>

Delegación Presidencial Regional de Ñuble. (2022). Anexo 10.1: *Plan por amenaza volcánica*. Complejo Volcánico Nevados de Chillán (Versión 0.2). Dirección Regional de ONEMI – Región de Ñuble. <https://bibliogrd.senapred.gob.cl/bitstream/handle/2012/1887/Anexo%2010.1%20Plan%20Regional%20de%20Emergencia%20por%20Amenaza%20%20Volc%20a1nica%20CVNCh%20V%200.2.pdf?sequence=25&isAllowed=y>

Dietrich, W.E. and Montgomery, D.R. (1998) *Shalstab: A digital terrain model for mapping shallow landslide potential* (Technical Report), National Council for Air Stream Improvement.

Dixon, H., Murphy, M., Sparks, S., Chávez, R., Naranjo, J. A., Dunkley, P., Young, S., Gilbert, J., & Pringle, M. (1999). The geology of Nevados de Chillán volcano, Chile. *Revista Geológica de Chile*, 26, 227-253.

Foschiatti, A. M. (2004). *Vulnerabilidad global y pobreza*. Geografía Digital. <http://hum.unne.edu.ar/revistas/geoweb/Geo2/archivos/vulglobal.pdf>

Geoffroy, C., & Ciocca, I. (2023). Los peligros volcánicos en la planificación urbana en Chile. *Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres REDER*, 7(2), 36-56. <https://doi.org/10.55467/reder.v7i2.123>

Gill, J. C., & Malamud, B.D. (2017). Anthropogenic processes, natural hazards, and interactions in a multi-hazard framework, *Earth-Science Reviews*, 166, 246-269. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012825216302227>

Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Leetmaa, A., Reynolds, R., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K.C., Ropelewski, C., Wang, J., Jenne, R., & Joseph, D. (1996). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project: *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(3), 437–471. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077%3C0437:TNYRP%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077%3C0437:TNYRP%3E2.0.CO;2)

Mastin, L. G., Van Eaton, A. R., & Lowenstern, J. B. (2014). Modeling ash fall distribution from a Yellowstone supereruption. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15, 3459-3475. <https://doi.org/10.1002/2014GC005469>

Determinación De Zonas De Amenaza Volcánica En El Complejo
Volcánico Nevados De Chillán Mediante Modelación Numérica.

- Mastin, L.G., Randall, M.J., Schwaiger, H.F., & Denlinger, R.P. (2021), *User's guide and reference to the web interface of Ash3d—A three-dimensional model for Eulerian atmospheric tephra transport and deposition (ver. 2.0, April 2021)*. U.S. Geological Survey Open-File Report 2013–1122. <https://doi.org/10.3133/ofr20131122>
- Montgomery, D.R. & Dietrich, W.E. (1994) A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research*, 30, 1153-1171. <https://doi.org/10.1029/93WR02979>
- National Centers for Environmental Prediction, & National Center for Atmospheric Research. (2021). *NCEP/NCAR Reanalysis 1*. NOAA/OAR/ESRL Physical Sciences Laboratory. <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>
https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensodisc_aug2021/ensodisc_Sp.shtml
- Orozco, G., Jara, G., & Bertin, D. (2016) Peligros del Complejo Volcánico Nevados de Chillán. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental*.
- OUM. (2011). Atlas de peligros naturales. <http://www.oumpuebla.com/documents/descarga2.pdf>
- Pavón, F., Andrade, S. D., Bernard, B., & Contreras, D. (2019). Impacto socioeconómico por lahares y caída de ceniza ante la erupción del volcán Cayambe en la actividad florícola en Cayambe y Pedro Moncayo. *Revista Cartográfica*, (98), 123-143. <https://doi.org/10.35424/rcarto.i98.144>
- Schwaiger, H., Denlinger, R., & Mastin, L. G. (2012). Ash3d: A finite-volume, conservative numerical model for ash transport and tephra deposition. *Journal of Geophysical Research*, 117, B04204. <https://doi.org/10.1029/2011JB008968>
- Sellés, D., Rodríguez, C., Dungan, M., Naranjo, J., & Gardeweg, N. (2004). *Geochemistry of Nevado de Longavi Volcano (36.2°S): A compositionally atypical arc volcano in the Southern Volcanic Zone of the Andes*.
- SERNAGEOMIN. (2017a). *Complejo Volcánico Nevados de Chillán*. <http://www.sernageomin.cl/complejo-volcanico-nevados-de-chillan/>
- Suzuki, T. (1983). A theoretical model for dispersion of tephra. In D. Shimozuru & I. Yokoyama (Eds.), *Arc Volcanism: Physics and tectonics* (pp. 95–113). Tokyo: Terra Scientific Publishing Company.
- Torres, R., Ponce, P., & Martínez, D. (2017). Vulnerabilidad física de cubiertas de edificaciones de uso de ocupación normal ante caídas de ceniza en la zona de influencia del volcán Galeras. *Boletín de Geología*. 39(2), 67-82.
- Yongliang, G., Shulong, X., & Lijuan, X. (2008). Numerical simulation of process of cavity filling and solidifying in TiAl alloy investment casting. *Materials Science Forum*, 575–578, PA.