

Avances y Desafíos en la Evaluación de Peligros Volcánicos en la Red Nacional de Vigilancia Volcánica de Chile

Franco Vera¹, Felipe Flores¹, Virginia Toloza¹, Gabriela Jara¹, Constanza Perales¹, Laura Bono¹, Lizette Bertin² y Constanza Jorquera³.

¹ Unidad de Geología y Peligros de Sistemas Volcánicos, Red Nacional de Vigilancia Volcánica, Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago, Chile - franco.vera@sernageomin.cl

² Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur, Red Nacional de Vigilancia Volcánica, Servicio Nacional de Geología y Minería, Temuco, Chile

³ Oficina Técnica de Coyhaique, Departamento de Geología Aplicada, Servicio Nacional de Geología y Minería, Coyhaique, Chile

Palabras clave: Peligros volcánicos, Mapas de Peligro.

El territorio continental de Chile alcanza un largo de 4.270 km, en cuya extensión posee un arco volcánico casi-continuo que alberga cerca de 90 volcanes con actividad registrada en el periodo Holoceno (SERNAGEOMIN, 2019). Asimismo, en los Andes chilenos existe una marcada segmentación longitudinal en el espesor de la corteza, variando desde 70 km en los Andes Centrales hasta espesores menores a 40 km en los Andes Patagónicos (Tassara y Yañez, 2003). Estas características propician la variabilidad en los procesos de generación de magmas y, por ende, favorecen la heterogeneidad en estilos eruptivos, magnitudes y peligros volcánicos.

En los últimos 50 años en Chile, han ocurrido cerca de 20 erupciones de Índice de Explosividad Volcánica (IEV) superior a 2, incluyendo las erupciones plinianas del volcán Hudson del año 1991 y del volcán Chaitén entre los años 2008 y 2009, que tuvieron IEV superiores a 4. Adicional a esto, numerosas explosiones y/o emisiones menores de IEV 0-1 se han registrado en volcanes con actividad frecuente, tales como el Villarrica, Llaima, Láscar, Planchón-Peteroa, Copahue y Nevados de Chillán.

Sumado a la alta frecuencia eruptiva, un 20% de la población de Chile está expuesta al impacto directo de procesos volcánicos, la cual se concentra mayoritariamente en la zona centro-sur del país (desde Santiago hasta Puerto Montt) (Lara et al., 2011). Sin embargo, la afectación por peligros volcánicos aumenta ampliamente al considerar que elementos de importancia político-administrativa (ej. rutas de conectividad regional, nacional e internacional), económica y social se encuentran en zonas de alta susceptibilidad.

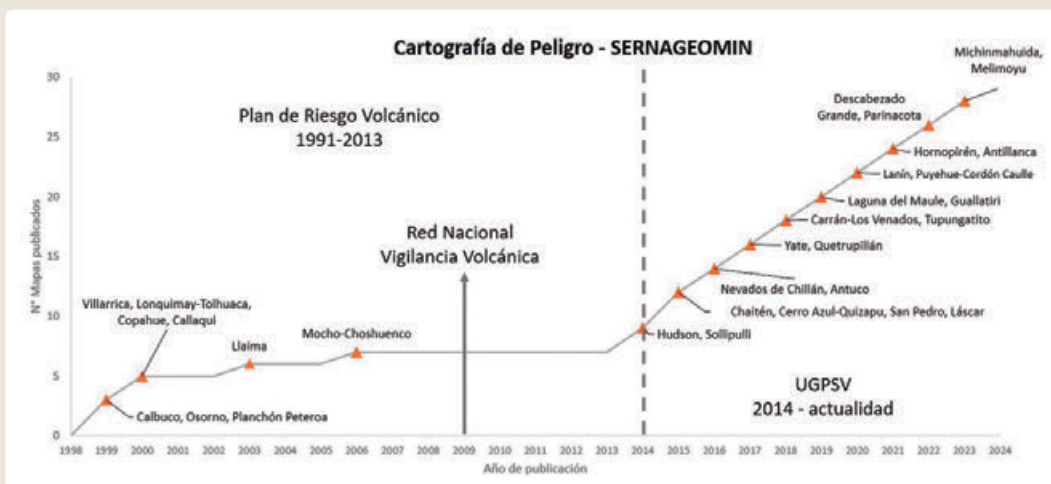
Este escenario de actividad volcánica y exposición, representa un desafío para la evaluación de peligros volcánicos en el corto y largo plazo, por lo que en este trabajo se desarrolla una revisión enfocada en la evolución de la cartografía de peligros volcánicos en Chile, sus variaciones metodológicas, la diversificación de productos y los desafíos futuros en el contexto nacional.

Los primeros esfuerzos por la evaluación de peligros volcánicos guiados por una política de Estado se remontan a los años 90. Esta fue impulsada por el progreso en el conocimiento geológico de los volcanes activos, en conjunto, con el surgimiento de la regulación ambiental (Ley 19.300, 1994) que exigía una línea de base de amenazas naturales. De esta forma, el Estado paulatinamente asumió la responsabilidad de incentivar el estudio sistemático del peligro volcánico, y fue a través de su servicio geológico, el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), que comienzan a materializarse.

Las primeras publicaciones oficiales de cartografía de peligros volcánicos por parte de SERNAGEOMIN comenzaron el año 1999. En este periodo se publicaron los mapas de los volcanes Calbuco, Osorno, Planchón - Peteroa, Villarrica y la zona del Alto Biobío, que incluía a los volcanes Lonquimay - Tolhuaca, Copahue y Callaqui (Fig. 1). Durante la década del 2000, hubo solo dos publicaciones de este tipo, que corresponden al Mapa de Peligros del volcán Llaima (publicado el año 2003) y al del Mocho Choshuenco (publicado el año 2006). En esta primera etapa, que podría extenderse hasta la erupción del volcán Chaitén en el año 2008, la elaboración de cartografía estaba fuertemente basada en el reconocimiento de

campo de los productos volcánicos, similar a la clasificación de mapas basados en geología que propone Calder et al. (2015), sin utilización de metodologías complementarias, tales como modelos numéricos, poco desarrolladas en aquella época. Por otro lado, la priorización de los volcanes en cuáles se evaluaría el peligro, no estaba basada en un criterio cuantitativo, como podría ser un ranking (e.g., Ewert et al., 2005). Sin embargo, el juicio experto de los profesionales a cargo, permitió que los volcanes que posteriormente iban a ser considerados en los primeros lugares del ranking de riesgo específico (e.g. Villarrica, Llaima y Calbuco; SERNAGEOMIN, 2019), fueran parte de este primer grupo de volcanes en Chile en contar con mapas de peligro volcánico.

La erupción del volcán Chaitén entre los años 2008 y 2009, sin duda marca un hito en el desarrollo de la volcanología en Chile. Si bien, la gestión de la emergencia podría considerarse exitosa, en cuanto no hubo fatalidades directas y se evacuaron más de 4.000 personas en forma oportuna, este evento sorprendió a autoridades, organismos de respuesta y, sobre todo, reveló la precariedad del monitoreo y del conocimiento de los peligros volcánicos en Chile. Con este diagnóstico, el Estado decide invertir en un sistema de monitoreo volcánico y acelerar el conocimiento volcanológico nacional, creando la Red Nacional de Vigilancia Volcánica (RNVV), con lo cual se inicia una nueva etapa en la producción de mapas de peligro.



► Fig. 1 – Gráfico acumulado de publicaciones de cartografía de peligro volcánico en SERNAGEOMIN desde el año 1999. En triángulo naranja se representa el año de publicación con el nombre del volcán evaluado.

Los primeros 5 años de la RNVV (2009 - 2013), comienzan con los estudios sistemáticos de cartografía de peligro, junto a una planificación de largo plazo para darle cobertura a los volcanes más riesgosos del país. Esta etapa tuvo un enfoque marcado por una mirada de gran escala, tendiente al desarrollo de un conocimiento base general y de amplia cobertura territorial. Es así como se publican el Mapa de Peligros Volcánicos de Chile junto con la primera versión del ranking de riesgo específico de los volcanes chilenos (Lara et al., 2011) y el Mapa de Peligros Volcánicos de la Zona Norte de Chile (Amigo et al., 2012).

En paralelo, se inicia un proceso de discusión y paulatina asimilación de las diferentes metodologías para la evaluación de peligro, tales como el uso de modelos numéricos y matrices de integración de peligro.

A partir del año 2014, se consolida un grupo dedicado al estudio de los volcanes y la evaluación de su peligro a corto y largo plazo dentro de la RNVV, denominado en la actualidad como Unidad de Geología y Peligros de Sistemas Volcánicos (UGPSV). Esta consolidación de un grupo de trabajo se sostiene bajo la implementación de flujogramas definidos y metodologías basadas en tres principios: Objetividad, Representatividad y

Replicabilidad. La evaluación de peligro a largo plazo se ha llevado a cabo bajo una estructura de gestión de proyecto, la cual ha garantizado una continuidad en la publicación de mapas de peligro volcánico, logrando publicar al menos 2 mapas por año (Fig. 1), y proyectando que al año 2023 se publique la totalidad de los mapas de peligro de los 30 primeros volcanes del ranking de riesgo específico vigente a la fecha (SERNAGEOMIN, 2019).

En la actualidad, la metodología para la elaboración de mapas de peligros utilizada por la UGPSV se basa en una evaluación multicriterio, la que representa el análisis de los diferentes peligros en un mapa integrado, similar a los mapas integrados identificados por Calder et al. (2015), pero con componentes de geología, modelación numérica y aplicación de técnicas probabilísticas.

Los procesos volcánicos evaluados se identifican y caracterizan en terreno, para luego complementarlos con modelos numéricos. Los peligros analizados junto con los modelos implementados a la fecha en la UGPSV son: 1) Coladas de lava: Q-LavHA (Mossoux et al., 2016); 2) Corrientes de densidad piroclásticas: Conos de energía de secciones transversales rectas (Malin y Sheridan, 1982) y parabólicas (Orozco et al., 2013; desarrollado por el geólogo D. Bertin), y Volcflow (Kelfoun y Druitt, 2005); 3) lahares: LaharZ (Schilling, 1998); 4) dispersión de cenizas: Tephra 2 (Bonadonna et al., 2005); 5) piroclastos de proyección balística: Ballistics (Bertin, 2017); y avalanchas volcánicas: Volcflow (Kelfoun y Druitt, 2005).

Este análisis de peligro se estructura en 4 etapas principales: 1) Recopilación de Antecedentes, 2) Levantamiento de Información, 3) Producción, y 4) Edición y Publicación (Fig. 2).

En la etapa de Recopilación de Antecedentes se planifica el proyecto. A partir de la conformación del equipo de trabajo, se discuten los objetivos y alcances que se esperan lograr con la evaluación. Aquí se hace un énfasis en la compilación de antecedentes, incluyendo bibliografía y entrevistas con profesionales, con especial atención en el registro de la actividad histórica e impactos asociados al volcán. Adicionalmente, se establece la escala temporal (que varía entre 8 y 25 ka) y la escala espacial (que varía entre 1:50.000 y 1:75.000). También, se considera la recopilación de insumos tales como imágenes satelitales y modelos de elevación digital, y se establecen los primeros contactos con los grupos de interés locales, con el objetivo de recoger experiencias de la comunidad e información sobre sitios de interés para el proyecto.

La segunda etapa corresponde al Levantamiento de Información. Consiste en el levantamiento de evidencia geológica para comprender el comportamiento eruptivo del sistema volcánico, y se sustenta en levantamientos de tipo: 1) tefroestratigráficos y geocronológicos, 2) geoquímicos y petrológicos, y 3) morfológicos y estructurales. Esta información, en conjunto con el análisis fotogeológico e hidrológico, permite identificar zonas susceptibles a ser afectadas por procesos volcánicos, además de complementar el catastro eruptivo. En esta etapa se describen físicamente los depósitos, realizando caracterización y correlación de ellos, detallando sus alcances, magnitudes, volúmenes y parámetros físicos que sean de utilidad para la posterior aplicación de modelos numéricos.

La etapa de Producción consiste en la consolidación de los resultados obtenidos en el levantamiento de información. En esta parte del estudio, se construye el modelo geológico, el análisis de susceptibilidad, modelamientos numéricos, análisis de recurrencias y magnitudes, cartografía de áreas de peligro y aplicación de matriz de integración. Aquí se evalúa la probabilidad de ocurrencia de cada peligro junto con los factores condicionantes que favorecen su



► Fig. 2 –Estructura general de las etapas desarrolladas en la cartografía de peligros volcánicos de SERNAGEOMIN.

ocurrencia, además de identificar y delimitar las áreas que podrían ser impactadas en futuras erupciones. Esta etapa se acompaña de clínicas de discusión internas, donde se presentan y discuten los resultados con los pares. En paralelo, se describe el procedimiento y los resultados obtenidos, lo que se plasma en una memoria explicativa que acompaña al mapa en la publicación.

Por último, cuando la evaluación del peligro ha finalizado, el producto se somete a un proceso editorial conducente a su publicación. Los encargados de este control de calidad son el Comité Editor, la Unidad de Sistemas de Información Geográfica (USIG) y Unidad de Publicación, todas pertenecientes al SERNAGEOMIN. Este proceso consiste en una serie de revisiones y correcciones, con editores internos y externos a la institución, que permiten mantener un estándar de publicación homogéneo entre los diferentes proyectos.

Otro aspecto a destacar en el avance de la evaluación de peligros de la RNVV, es la diversificación de productos en cuanto a escalas temporales (corto y largo plazo) y a escalas espaciales. En relación a las escalas temporales, se han desarrollado productos de largo plazo, como los explicados en los párrafos anteriores, y productos a corto plazo, enfocados en la respuesta a crisis y alertas volcánicas. Estos últimos se denominan Mapas Dinámicos, y corresponden a una representación geoespacial de las zonas de posible afectación por procesos volcánicos superficiales en curso, según los escenarios eruptivos de actividad reflejada en los parámetros de monitoreo. Asimismo, se han desarrollado evaluaciones geológicas de puntos de encuentro transitorio (PET), enfocados en la planificación de evacuación ante eventuales crisis eruptivas, las que han sido trabajadas con la Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior (ONEMI) y con las municipalidades aledañas a volcanes activos.

Por otro lado, la UGPSV se encuentra desarrollando 3 tipos de mapas que se diferencian por escala espacial: Mapas de Peligros Volcánicos Regular, Mapas de Peligros Volcánicos Regional y Mapas de Peligros Volcánicos Microzonificado.

Los Mapas de Peligro Volcánico Regular representan la evaluación de peligro volcánico de un único volcán o

de un grupo de volcanes cercanos. Son confeccionados con objetivo en la planificación de la emergencia y su construcción abarca una ventana temporal que varía entre 8 y 25 ka, dependiendo de las características del sistema volcánico. Comúnmente son publicados en escala 1:50.000 o 1:75.000, y son acompañados de una memoria explicativa que describe la metodología utilizada, escenarios y limitaciones. Estos, además, incluyen elementos complementarios, tales como insertos de menor escala para representación de peligros de mayor cobertura (e.g. caída de piroclastos), línea de tiempo de erupciones en la ventana temporal, y leyendas extendidas. Este tipo de mapas tiene asociada una base de datos en SIG, que contiene la información necesaria de los polígonos, líneas y puntos del mapa de peligros. Cabe destacar que, en campos volcánicos distribuidos, se han realizado evaluaciones probabilísticas de aparición de un nuevo centro de emisión (susceptibilidad espacial volcánica), a través de la implementación de los softwares MathHaz (Bertin et al., 2019) y QVAST (Bartolini et al., 2013).

Los Mapas de Peligro Volcánico Regional consisten en una evaluación de una región volcánica en particular, considerando cada volcán de manera independiente, pero siendo integrados en un mapa síntesis. Las escalas utilizadas son de 1:250.000 y 1:3.000.000, las que incluyen los peligros proximales y distales, respectivamente. Su objetivo principal es la planificación estratégica regional, y suele entregar indicios de las zonas en que es necesario profundizar el análisis de peligro volcánico a escalas de mayor detalle, resultando de utilidad para el diseño de medidas de mitigación y de vigilancia instrumental.

Por otra parte, los Mapas de Peligro Volcánico Microzonificado son representaciones de alto detalle, a escala 1:25.000, enfocados al apoyo de labores de planificación territorial en los volcanes de mayor riesgo según el ranking de SERNAGEOMIN (2019). Estos se encuentran actualmente en desarrollo, y se espera su implementación dentro de los próximos años. Su confección se concentra en áreas prioritarias, tales como flancos de un volcán o valles en específico, y su priorización se realiza en base a las zonas de mayor exposición dentro de los volcanes activos chilenos. Adicionalmente, producto del desafío que conlleva el trabajo a mayor detalle, para este tipo de mapas se han implementado nuevas metodologías.

En colaboración con la Universidad de Concepción, se ha desarrollado una matriz semi-cuantitativa de integración de peligros, la que se basa en la relación entre frecuencia e intensidad de impacto (e.g. MIAVITA, 2012). Por otro lado, se han implementado nuevos modelos numéricos para la simulación de procesos volcánicos, principalmente para lahares, como por ejemplo Ramms (WSL, 2013) y LaharFlow (<https://www.laharflow.bristol.ac.uk/>), y para corrientes de densidad piroclástica, como por ejemplo Volcflow (Kelfoun y Druitt, 2005) y Conos de Energía de sección parabólica (Orozco et al., 2013). Cabe destacar, que algunos de estos modelos también han sido utilizados en los últimos Mapas de Peligro Regular publicados. Además, se han construido árboles probabilísticos de eventos a largo plazo (Newhall y Hoblitt, 2002), los que han aportado a la identificación de escenarios eruptivos probables.

Los más de 20 años de experiencia acumulada por SERNAGEOMIN en la evaluación de peligros volcánicos en Chile, en conjunto con la evolución en el conocimiento volcanológico a nivel mundial, ha conllevado diversos aprendizajes, pero ha dejado al descubierto problemáticas a resolver. Además de las limitaciones inherentes a la pérdida de registro geológico, existen desafíos relativos a cómo obtener mapas objetivos y reproducibles, a cómo evaluar la utilización de los resultados, cómo evaluar el error y la incertidumbre, y en qué enfocar nuestros productos: Comunicación, planificación territorial o emergencias.

Para ello, se ha implementado una estructura de definición de análisis de peligros volcánicos propuesta por Jorquera (2018), la que tiene como objetivo el apoyar la definición y documentación de análisis de peligros, y apoyar la comprensión del propósito del análisis, sus resultados, limitación e implementación. Esta consiste en 10 pasos, que consisten en: 1) Definición del problema, 2) Objetivos y utilización, 3)

Tipo, origen y magnitud de los peligros, 4) Escenarios eruptivos y escala de tiempo, 5) Escala y resolución espacial, 6) Elementos vulnerables, 7) Metodología a utilizar, 8) Formato de los resultados, 9) Limitaciones e incertidumbres y, finalmente, 10) Indicaciones y ejemplos para la utilización de los resultados.

En conclusión, en la actualidad la Red Nacional de Vigilancia Volcánica, a través de su Unidad de Geología y Peligros de Sistemas Volcánicos, ha avanzado en evaluaciones de peligro con mayor diversidad en su representación, en base a los principios de Objetividad, Representatividad y Replicabilidad. Se ha migrado a productos de mayor detalle, como la evaluación geológica de puntos de encuentro transitorio, enfocada en emergencias, y la elaboración de Mapas de Peligro Volcánico Microzonificado, enfocados en planificación territorial, así como también se ha aumentado la cobertura nacional con la elaboración de Mapas de Peligro Volcánico Regular y Mapas de Peligro Volcánico Regional. En este sentido, de los 92 volcanes considerados geológicamente activos en territorio nacional, 26 de ellos cuentan con un Mapa de Peligro Volcánico Regular, 6 se encuentran en etapa editorial o en proceso de publicación y 2 en etapa de levantamiento de información. Asimismo, se ha avanzado en la implementación de bases de datos SIG y visores interactivos en la web:

(ej. <https://rnvv.sernageomin.cl/volcan-villarrica/>), que han sido útiles en el orden de la información levantada y para la representación digital de las evaluaciones. Finalmente, se ha mantenido una continua mejora en la metodología empleada, llevando a cabo discusiones periódicas de revisión metodológica que han permitido la implementación de nuevas matrices de integración, calibración de modelos numéricos al contexto volcánico nacional, nuevas formas de representación de los peligros distales (e.g. caída de piroclastos y lahares secundarios), establecer las incertidumbres y reconocer las limitaciones de los productos.

AGRADECIMIENTOS

El equipo agradece a los funcionarios que han apoyado a la elaboración de cartografía volcánica y a los profesionales externos que han aportado en el desarrollo de los proyectos.

REFERENCIAS

- ▶ Amigo, A.; Bertin, D.; Orozco, G. (2012). Peligros Volcánicos de la Zona Norte de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental. 1 mapa escala 1:250.000. Santiago.
- ▶ Bartolini, S., Cappello, A., Martí, J., & Del Negro, C. (2013). QVAST: a new Quantum GIS plugin for estimating volcanic susceptibility. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(11), 3031-3042.
- ▶ Bertin, D. (2017). 3-D ballistic transport of ellipsoidal volcanic projectiles considering horizontal wind field and variable shape-dependent drag coefficients. *Journal of Geophysical Research, Solid Earth* 122 (2): 1126-1151. doi: 10.1002/2016JB013320
- ▶ Bertin, D., Lindsay, J. M., Becerril, L., Cronin, S. J., & Bertin, L. J. (2019). MatHaz: a Matlab code to assist with probabilistic spatio-temporal volcanic hazard assessment in distributed volcanic fields. *Journal of Applied Volcanology*, 8(1), 1-25.
- ▶ Bonadonna, C.; Connor, C.B.; Houghton, B.F.; Connor, L.J.; Byrne, M.; Laing, A.; Hincks, T.K. (2005). Probabilistic modeling of tephra dispersal: Hazard assessment of a multiphase rhyolitic eruption at Tarawera, New Zealand. *Journal of Geophysical Research* 110(B3): 1-21. doi: 10.1029/2003JB002896.
- ▶ Calder, E., Wagner, K., & Ogburn, S. (2015). Volcanic hazard maps. *Global volcanic hazards and risk*, 335-342.
- ▶ Ewert, J. W., Guffanti, M., & Murray, T. L. (2005). An assessment of volcanic threat and monitoring capabilities in the United States: framework for a National Volcano Early Warning System (No. 2005-1164). US Geological Survey.
- ▶ Kelfoun, K.; Druitt, T.H. (2005). Numerical modeling of the emplacement of Socompa rock avalanche, Chile. *Journal of Geophysical Research* 110(B12). doi: 10.1029/2005JB003758.
- ▶ Lara, L.E.; Orozco, G.; Amigo, A.; Silva, C. (2011). Peligros Volcánicos de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental 13: 34 p., 1 mapa escala 1:2.000.000. Santiago.
- ▶ MIAVITA, 2012. Handbook for Volcanic Risk Management: Prevention, Crisis Management, Resilience. Orleans, Francia.
- ▶ Mossoux, S.; Saey, M.; Bartolini, S.; Poppe, S.; Canters, F.; Kervyn, M. 2016. Q-LAVHA: A flexible GIS plugin to simulate lava flows. *Computers and Geosciences* 97: 98-109. doi: 10.1016/j.cageo.2016.09.003.
- ▶ Newhall, C., & Hoblitt, R. (2002). Constructing event trees for volcanic crises. *Bulletin of Volcanology*, 64(1), 3-20.
- ▶ Orozco, G.; Amigo, A.; Bertin, D.; Lara, L.E. 2013. New empirical approach to estimate proximal volcanic hazard zones. In *Forecasting volcanic activity-Reading and translating the messages of nature for society*. International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior (IAVCEI), Scientific Assembly, Poster Session 3W_4C-P7. Kagoshima.
- ▶ Schilling, S.P. 1998. LAHARZ; GIS programs for automated mapping of lahar-inundation hazard zones. U.S. Geological Survey, Open-File Report 98-638: 80 p. doi: 10.3133/ofr98638.
- ▶ SERNAGEOMIN. 2019. Ranking de riesgo específico para volcanes activos de Chile 2019. https://www.sernageomin.cl/wpcontent/uploads/2020/07/2Ranking-2019_Tabla_Final.pdf. (Última visita 15/07/2022).
- ▶ Tassara, A., & Yáñez, G. (2003). Relación entre el espesor elástico de la litosfera y la segmentación tectónica del margen andino (15-47 S). *Revista geológica de Chile*, 30(2), 159-186.
- ▶ WSL (Institute for Snow and Avalanche Research SLF), 2013. Rapid mass movements simulation (RAMMS): User Manual v1.5 Debris Flow. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, Swiss Federal Institutes of Technology.