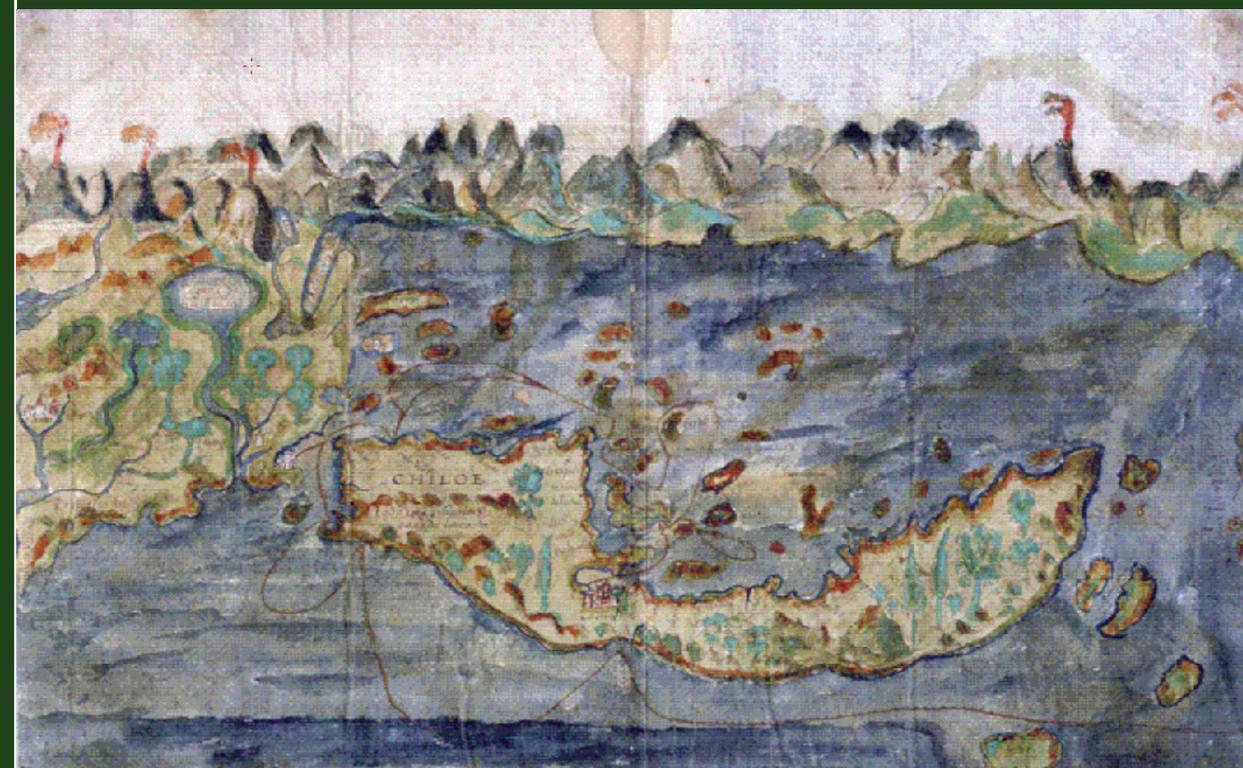




ISSN 0717-7305

SUBDIRECCIÓN NACIONAL DE GEOLOGÍA



PELIGROS VOLCÁNICOS DE CHILE

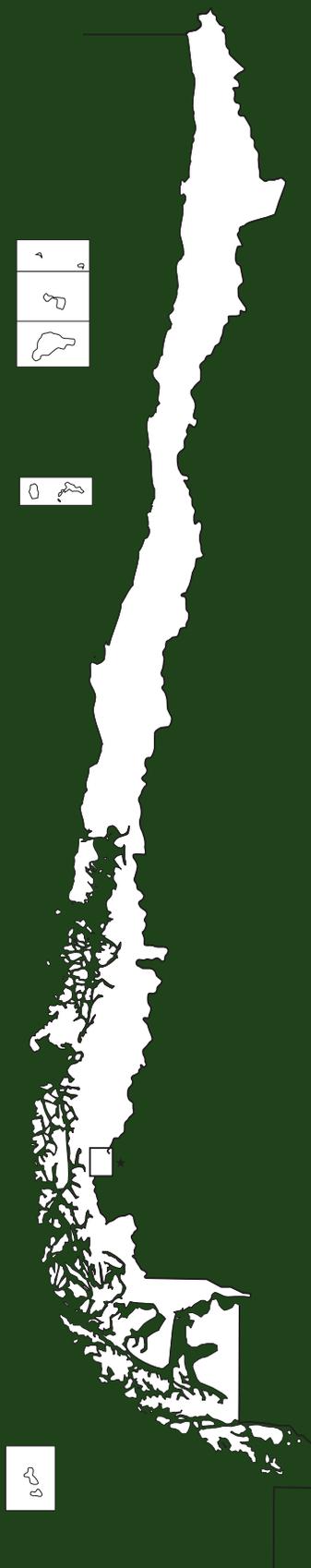
Luis E. Lara P.
Gabriel Orozco L.
Álvaro Amigo R.
Carolina Silva P.

CARTA GEOLÓGICA DE CHILE

SERIE GEOLOGÍA AMBIENTAL

No. 13

Escala 1:2.000.000
2011



TERRITORIO CHILENO ANTÁRTICO

POLO SUR

"ACUERDO ENTRE LA REPUBLICA DE CHILE Y LA REPUBLICA ARGENTINA PARA RESOLVER EL RECONOCIMIENTO DEL LIMITE DESDE EL MONTE FITZ ROY HASTA EL CERRO DAUDET" (Buenos Aires, 18 de diciembre de 1986)

CARTA GEOLÓGICA DE CHILE SERIE GEOLOGÍA AMBIENTAL

- No. 1 Respuesta Sísmica de la Cuenca de Santiago, Región Metropolitana de Santiago. 2003. J.C. Fernández. 1 mapa escala 1:100.000.
- No. 2 Peligro de Remociones en Masa e Inundaciones de la Cuenca de Santiago, Región Metropolitana de Santiago. 2003. J.L. Antinao, J.C. Fernández, J.A. Naranjo, P. Villarroel. 1 mapa escala 1:100.000.
- No. 3 Rocas y Minerales Industriales de la Cuenca de Santiago, Región Metropolitana de Santiago. 2003. J.L. Antinao. 1 mapa escala 1:100.000.
- No. 4 Vulnerabilidad a la Contaminación de los Acuíferos de la Cuenca de Santiago, Región Metropolitana de Santiago. 2003. S. Iriarte. 1 mapa escala 1:100.000.
- No. 5 Geología para el Ordenamiento Territorial: Cuenca de Santiago, Región Metropolitana de Santiago. 2003. J.L. Antinao, J.C. Fernández, S. Iriarte. 1 mapa escala 1:100.000.
- No. 6 Geología para el Ordenamiento Territorial: Área de Osorno, Región de Los Lagos. 2003. Y. Pérez, J. Milovic, R. Troncoso, J. Hanisch, F. Helms, M. Toloczyki. Texto y 6 mapas escala 1:100.000.
- No. 7 Mapa de Peligros del Volcán Llaima, Región de La Araucanía. 2003. H. Moreno, J.A. Naranjo. 1 mapa escala 1:75.000.
- No. 8 Geología para el ordenamiento territorial: Área de Valdivia, Región de Los Lagos. 2005. M. Arenas, C. Jara, J. Milovic, Y. Pérez D., R. Troncoso; J. Behlau, J. Hanisch, F. Helms 7 mapas, escala 1:100.000 y 1:25.000.
- No. 9 Peligros del Complejo Volcánico Mocho-Choshuenco: Región de Los Lagos. H. Moreno, J. Naranjo. 1 mapa escala 1:50.000.
- No. 10 Peligros del Complejo Volcánico Taapaca, Región de Arica y Parinacota. J. Clavero, Escala 1:50.000.
- No. 11 Geología para el ordenamiento territorial del Área de Temuco, Región de La Araucanía. 2007. R. Troncoso, M. Arenas, C. Jara, J. Milovic, Y. Pérez D. Texto y 6 mapas, escala 1:100.000.
- No. 12 Microzonificación sísmica de la ciudad de Concepción, Región del Biobío. 2010. J. Vivallos, P. Ramírez y A. Fonseca. 1 mapa escala 1:20.000.

SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA - CHILE

SUBDIRECCIÓN NACIONAL DE GEOLOGÍA

**P E L I G R O S V O L C Á N I C O S
D E C H I L E**

Luis E. Lara P.
Gabriel Orozco L.
Álvaro Amigo R.
Carolina Silva P.

CARTA GEOLÓGICA DE CHILE
SERIE GEOLOGÍA AMBIENTAL

No. 13

Escala 1:2.000.000

2011

PELIGROS VOLCÁNICOS DE CHILE

Escala 1:2.000.000

CARTA GEOLÓGICA DE CHILE

SERIE GEOLOGÍA AMBIENTAL, No. 13, 2011

ISSN 0717-7305

Inscripción No. 208.935

©Servicio Nacional de Geología y Minería, Avda. Santa María 0104, Casilla 10465, Santiago, Chile.

Director Nacional: Enrique Valdivieso V.

Subdirector Nacional de Geología (S): Waldo Vivallo S.

Derechos reservados. Prohibida su reproducción.

Comité Editor: Mauricio Calderón, Aníbal Gajardo, Renate Wall Z. (coordinadora).

Editores: Aníbal Gajardo, Sergio Sepúlveda, Renate Wall.

Jefe de Publicaciones: Manuel Suárez D.

Encargada de Publicaciones y corrección idiomática: Soraya Amar N.

Diagramación: Mariela González A.

Referencia bibliográfica:

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.

Portada: Carta de la costa de Chiloé realizada en 1644 por Alonso de Ovalle S.J. (1603-1651). Esta es una de las primeras representaciones del territorio que reconoce la presencia de volcanes activos.

CONTENIDO

RESUMEN.....	5
ABSTRACT	5
INTRODUCCIÓN.....	5
DEFINICIONES GENERALES.....	6
VOLCANES ACTIVOS DE CHILE.....	8
ERUPCIONES HISTÓRICAS Y SU IMPACTO	8
RIESGO VOLCÁNICO ESPECÍFICO ASOCIADO A LOS VOLCANES ACTIVOS	11
ZONIFICACIÓN DEL PELIGRO VOLCÁNICO A ESCALA NACIONAL	14
CAÍDA DE PIROCLASTOS: ÁREA DE IMPACTO PROXIMAL Y DISTAL	15
LAVAS, LAHARES, FLUJOS PIROCLÁSTICOS Y AVALANCHAS VOLCÁNICAS: ÁREA DE IMPACTO PROXIMAL.....	15
CONCLUSIONES.....	16
AGRADECIMIENTOS	17
REFERENCIAS	17

FIGURAS

Fig. 1. Volcanes geológicamente activos en Chile continental.....	9
Fig. 2. Número de eventos volcánicos históricos (tomado de Petit-Breuilh, 2004)	11
Fig. 3. Distribución del puntaje asociado a los factores de peligro y riesgo específico.....	12

TABLAS

Tabla 1. Extracto de la base de datos global (Whitam, 2005).....	10
Tabla 2. Tipología de erupciones volcánicas propuesta por Mastin <i>et al.</i> (2010) y parámetros eruptivos principales	14

ANEXOS

21

I. ANTECEDENTES METODOLÓGICOS.....	23
II. MEMORIA DE CÁLCULO	25
Tabla 1. Factores de peligro, exposición y riesgo específico para los volcanes activos de Chile.....	25
Tabla 2. Memoria explicativa de los criterios para asignar valores a los factores de peligro y exposición	29
Tabla 3. Parametrización de los volcanes de Chile para estimación de sus áreas de peligro	31
Tabla 4. Categorías de erupciones esperadas	34

Mapa (fuera de texto)

PELIGROS VOLCÁNICOS DE CHILE.

Escala 1:2.000.000.

RESUMEN

El territorio continental de Chile posee 95 volcanes geológicamente activos, esto es, que presentan evidencias geológicas de actividad eruptiva en los últimos 10.000 años o que, sin certeza de lo anterior, presentan signos medibles de actividad, tales como desgasificación pasiva, microsismicidad o deformación de la superficie. Entre los volcanes activos se incluye tanto estratovolcanes individuales como centros compuestos o distribuidos e incluso grupos de conos monogénicos, que para este análisis se consideran una sola entidad. De acuerdo a los registros históricos, 61 de estos volcanes han generado más de 400 eventos volcánicos de diferente magnitud en los últimos 5 siglos y podrían reactivarse a corto plazo. Una evaluación objetiva del peligro volcánico a escala nacional se presenta en un mapa de síntesis escala 1:2.000.000. Esta representación ha sido construida considerando dos grupos principales de procesos: (1) lavas, lahares y flujos piroclásticos en el área proximal y media y (2) dispersión y caída de piroclastos tanto en el área proximal como media y distal. Para cada grupo se ha utilizado una metodología semi cuantitativa que permitió sistematizar el análisis. El peligro en las áreas proximales fue calculado considerando la movilidad esperada de cada tipo de flujo utilizando la razón H/L que mejor reproduce los datos de campo. Un radio externo de 30 km representa el límite máximo de los flujos laháricos y piroclásticos de mayor movilidad asociados a erupciones de alta magnitud en los estratovolcanes. Por otra parte, la dispersión y caída de piroclastos fue modelada considerando el escenario eruptivo moderado a alto para cada volcán de acuerdo a un conjunto acotado de erupciones tipo. A partir de esa definición, los parámetros eruptivos fueron usados para extraer la isópaca de 1 cm correspondiente a cada erupción tipo seleccionada. A su vez, los datos de circulación atmosférica fueron procesados estadísticamente para extraer los ejes de dispersión asociados a cada trimestre recogiendo así la variabilidad estacional y espacial. Posteriormente, las áreas fueron integradas para construir una escala de probabilidad relativa que condujo a la zonificación. Por último, una generalización controlada permitió obtener el mapa de síntesis.

El resultado de esta evaluación indica que, en alguna medida, alrededor del 20% del territorio nacional está expuesto al impacto de las erupciones volcánicas considerando cualquiera de los procesos asociados a ellas. Esta condición exige que las políticas públicas reflejen este factor incorporándolo en los instrumentos de planificación al mismo tiempo que promuevan otras medidas orientadas a mitigar el impacto de las erupciones volcánicas.

ABSTRACT

In mainland Chile, 95 geologically active volcanoes have been identified (*i.e.*, those with geological record of eruptive activity in the last 10,000 years, historical activity or evidence of volcanic unrest such as passive degassing, micro seismicity or surface deformation). Active centers include stratovolcanoes, compound volcanoes or distributed fields as well as monogenetic clusters forming single units. According to the written record, 61 of those centers produced more than 400 volcanic incidents of different magnitude in the last 5 centuries and may present short-term unrest episodes.

An objective assessment of regional volcanic hazards is presented as a 1:2.000.000 scale map. This approach consists in the delineation of potential areas to be impacted by two different set of processes: (1) lavas, lahars and pyroclastic flows in proximal and medial areas, and (2) pyroclastic dispersion and fallout from the source to distal areas. Semi-quantitative methodologies were applied for both groups, allowing systematic analyses. Proximal hazards have been estimated according to the expected mobility for volcanic-derived flows using a single H/L ratio that best fits field observations. In addition, an external radius of 30 km is assumed to represent the maximum runout of the highest mobility laharcic and pyroclastic flows associated with high magnitude eruptions. On the other hand, pyroclastic dispersion and fallout were addressed considering the most likely moderate-to-high eruptive event for each volcano, based on a fixed number of eruptive scenarios, and therefore areas covered by 1 cm isopach are outlined. In order to better represent seasonal variability in wind direction, pyroclastic dispersion under atmospheric conditions of 3 consecutive months are indicated. Areas impacted were integrated to produce a relative probability scale which defines hazard zones. Finally, a controlled generalization was conducted to obtain the synthetic map.

This hazard assessment indicates that roughly 20% of the Chilean continental territory is exposed to the impact of volcanic eruptions. Such condition implies that public policies must consider the volcano hazards factor in land planning guidelines along with additional suggestions in order to mitigate the impact of volcanic eruptions.

INTRODUCCIÓN

El impacto de los desastres naturales ocurridos en Chile y el mundo en la primera década del siglo XXI, ha renovado la preocupación de las autoridades y la comunidad respecto de la adecuada preparación que debe tener el país frente a ellos. En el ámbito de los procesos volcánicos, el impacto de la erupción del volcán

Chaitén el año 2008 fue una demostración elocuente de la necesidad de más y mejor información geológica que caracterice la amenaza y permita desplegar anticipadamente una estrategia de mitigación. Asimismo, en el contexto internacional, las erupciones de los volcanes Eyjafjallajökull (Islandia) y Merapi (Indonesia) ocurridas el año 2010, mostraron que eventos de magnitud moderada pueden causar importantes pérdidas económicas de escala regional en el caso del primero, y grave impacto local sobre la población en el caso del segundo.

En Chile, la preocupación de la comunidad y sus representantes contrasta con el estado del conocimiento general sobre los volcanes activos y el nivel de vigilancia instrumental que se mantiene sobre ellos. En general, la primera inconsistencia es que, no obstante la envergadura del problema, hasta el año 2009, el país había invertido escasamente en el desarrollo del conocimiento científico en torno a los volcanes, así como en la implementación de redes de monitoreo modernas y efectivas. Un avance mayor en esta línea lo representa el desarrollo del programa denominado Red Nacional de Vigilancia Volcánica, en cuyo seno se ejecuta un exigente plan de fortalecimiento y ampliación de las redes de vigilancia instrumental liderado por el Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur (OVDAS), así como un programa de estudio geológico y de evaluación de los peligros volcánicos denominado Programa de Riesgo Volcánico (PRV).

Sin embargo, preguntas básicas tales como: ¿cuántos volcanes activos existen en Chile?; ¿se concentran ellos en alguna región en particular?; ¿cuál es la probabilidad de una erupción mayor en el corto y mediano plazo? Y, finalmente, ¿cuál es la magnitud de este problema a escala nacional?, han recibido respuestas ambiguas o incompletas, que dificultan la elaboración de una política pública orientada a reducir el impacto de las erupciones volcánicas en la comunidad. Para enfrentar este vacío, el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN, la institución del Estado encargada de la generación de información geológica para la prevención de los riesgos naturales, de acuerdo al DL 3.525 y la Ley Orgánica 18.330 que lo constituye), ha trabajado en la generación de información a una escala apropiada para la dimensión del problema y en la aplicación de una metodología de diagnóstico que permita, con el concurso de otros actores, elaborar una estrategia de prevención y mitigación del impacto causado por las erupciones volcánicas en el territorio nacional. Así, la información presentada en este documento, constituye una guía de primer orden, a escala nacional, cuya aplicación puede visualizarse en el marco de la planificación del uso del territorio, así como considerarse una primera aproximación en condiciones de crisis volcánicas. En términos formales, el análisis básico realizado en este trabajo corresponde a: (1) una evaluación del riesgo (*sensu lato*) asociado a cada volcán con el objeto de obtener un sistema de clasificación y priorización y (2) una evaluación del peligro volcánico para cada centro con la finalidad de obtener una base para la integración final. Para facilitar la síntesis, se realizó una serie de operaciones lógicas y cartográficas que condujeron al resultado sintético aquí presentado a escala 1:2.000.000. Debido a su naturaleza y escala, estos resultados no deben extrapolarse a escalas de mayor detalle ni aplicarse en términos predictivos, aunque sí restringirán los escenarios máximos esperados y servirán como una necesaria guía básica para las evaluaciones de detalle.

DEFINICIONES GENERALES

Para homogeneizar la nomenclatura relacionada con el tema, se introduce aquí una serie de definiciones básicas que resultan fundamentales para contextualizar los resultados.

VOLCÁN, COMPLEJO VOLCÁNICO O GRUPO VOLCÁNICO

Conjunto de centros de emisión que comparten un sistema alimentador y que pueden considerarse genéticamente relacionados. El caso más general es un estratocono singular, ocasionalmente con centros eruptivos de flanco que pueden haber formado conos piroclásticos o sistemas de fisuras. En algunos casos, se reconocen diferentes estructuras volcánicas yuxtapuestas que constituyen un complejo volcánico. Dos o más centros monogénicos espacialmente asociados, pero geográficamente separados de los estratovolcanes vecinos, constituyen un grupo volcánico. Esta diversidad de morfoestructuras es considerada

como equivalente en este estudio y, sobre esa base, se construye el catálogo que constituye la base de evaluación.

VOLCÁN ACTIVO

Un volcán se considera geológicamente activo cuando ha tenido, al menos, una erupción en los últimos 10 mil años (Holoceno) o bien cuando, sin certeza de esto último, presenta signos cuantificables de actividad presente como desgasificación, sismicidad o deformación del terreno (Ewert *et al.*, 2005; Ewert, 2007; modificado de Simkin y Siebert, 1994). Esta es la definición operativa adoptada en este estudio y según ella, el territorio continental de Chile alberga 95 volcanes geológicamente activos.

PELIGRO

‘Hazard’ (ingl). Probabilidad de ocurrencia de un proceso en un tiempo y lugar determinado con una intensidad definida. En estricto rigor, los resultados de este estudio se expresan en términos cualitativos sin calcular la probabilidad de ocurrencia de los procesos descritos (que sería función, entre otras cosas, de la probabilidad de ocurrencia de alguna erupción, cuestión difícil de estimar en forma precisa) aunque tienen implícita una noción de probabilidad relativa.

VULNERABILIDAD

‘Vulnerability; Exposure’ (ingl.). Susceptibilidad al impacto que presentan los elementos potencialmente afectados. Ella puede expresarse de variadas formas según el elemento que se considere aunque comúnmente se indica como porcentaje de daño esperado. En efecto, existen metodologías objetivas para estimar la vulnerabilidad de la infraestructura así como las pérdidas económicas potenciales, aunque también se han desarrollado herramientas de análisis que incorporan variables sociales de las comunidades, entre ellas sus niveles de ingreso, educación, creencias o capacidad organizativa. (e.g., Wood y Souldard, 2009).

RIESGO (*sensu stricto*)

‘Risk’ (ingl). Valor esperado de las pérdidas asociadas a un proceso natural determinado que generalmente es conceptualizado como el producto del peligro y la vulnerabilidad. En un sentido estricto, el riesgo implica tanto la noción de probabilidad de ocurrencia de un proceso como los costos o pérdidas asociados a él.

RIESGO ESPECÍFICO

‘Specific Risk o Threat’ (ingl). Combinación de factores asociados con el peligro intrínseco que representa cada volcán (*hazard*) y la exposición (vulnerabilidad) del territorio potencialmente afectado. Según la definición provista por UNESCO (UNDRO, 1979), el riesgo específico hace referencia a las pérdidas potenciales en un intervalo de tiempo y un área geográfica determinados. En este trabajo se utiliza una definición especial que es equivalente a la propuesta por Ewert *et al.*, (2005) para la situación de los volcanes activos en EE.UU. No obstante, en este documento, el concepto de riesgo específico se utiliza exclusivamente como referencia para la clasificación de los volcanes.

ÍNDICE DE EXPLOSIVIDAD VOLCÁNICA (IEV)

‘Volcanic Explosivity Index (VEI)’ (ingl.). Permite estimar la magnitud de una erupción volcánica (*sensu* Newhall y Self, 1982) mediante factores tales como altura de la columna eruptiva y volumen total emitido. Se estructura sobre la base de una escala semi empírica de 8 grados en la que el volumen crece expo-

nencialmente desde $1 \times 10^{-5} \text{ km}^3$ en el límite entre VEI 0 y VEI 1. Existen otros indicadores de la envergadura de una erupción volcánica como la magnitud (Pyle, 2000), valor que es función directa de la masa emitida.

VOLCANES ACTIVOS DE CHILE

En Chile existen alrededor de 500 volcanes con actividad comprobada en el período Plioceno Superior-Holoceno (ca. 3,6 Ma-presente). De ellos, 186 tienen actividad verificada desde el Pleistoceno Medio al Holoceno (últimos 750.000 años) y 82 tienen registro seguro de actividad en el Holoceno (Simkin y Siebert, 1994; González-Ferrán, 1995). Entre los anteriores, 61 volcanes habrían tenido ciclos eruptivos históricos (e.g., Petit-Breuilh, 2004) y 34 exhiben actividad visible o detectable mediante instrumentos en el presente. Esto depende, por supuesto, de la disponibilidad de instrumentos en el entorno de cada volcán y las cifras anteriores necesariamente variarán de acuerdo al incremento del conocimiento geológico.

Los principales volcanes activos se encuentran en el continente, formando cadenas volcánicas como resultado del proceso de subducción de las placas de Nazca o Antártica bajo la placa Sudamericana (Stern, 2004); los del Territorio Antártico resultan de la compleja configuración en el sistema de Bransfield y los de las islas oceánicas corresponden esencialmente a 'hot spots' o plumas del manto que cruzan la placa de Nazca (Stern, 2004; Stern *et al.*, 2007).

Utilizando la definición presentada en la sección anterior, correspondiente también a aquella actualmente en uso por el U.S. Geological Survey de Estados Unidos, Chile posee 95 volcanes activos en el territorio continental (Fig. 1). A ellos se agregarían aquellos del Territorio Antártico Chileno, algunos en las islas oceánicas y otros sobre la llamada Dorsal de Chile que subduce frente al golfo de Penas. En una primera versión de este análisis, se reconocieron 122 volcanes activos en el continente (Lara *et al.*, 2006). Sin embargo, la revisión exhaustiva de los antecedentes disponibles ha permitido refinar el catálogo descartando aquellos que no cumplen a cabalidad con la definición, esencialmente por no presentar evidencia geológica de actividad en el Holoceno ni registro instrumental de actividad. Asimismo, cabe consignar que entre aquellos considerados activos existe una amplia variedad de volcanes, incluidos conos monogénicos a condición de que formen un grupo de dos o más individuos coalescentes. El grupo de volcanes geológicamente activos discrepa en menos de un 10% del catálogo elaborado por el Global Volcanism Program de la Smithsonian Institution (<http://www.volcano.si.edu/>; noviembre 2011), probablemente el registro global más completo sobre volcanes activos y que contiene 82 entradas en esa categoría (Siebert *et al.*, 2010).

Naturalmente, nuevos antecedentes científicos podrían modificar el número de volcanes geológicamente activos, en particular a partir de datos geocronológicos emergentes o registro instrumental de manifestaciones de actividad no perceptibles, en los numerosos centros volcánicos que carecen de estudios sistemáticos o que a la fecha son francamente desconocidos. Sin embargo, se estima improbable que este número varíe de manera significativa.

ERUPCIONES HISTÓRICAS Y SU IMPACTO

Desde el siglo XVI, momento en el cual se inicia el registro histórico en Chile, existe documentación de hasta 412 eventos volcánicos (erupciones y explosiones volcánicas de diferente magnitud, algunos de los cuales corresponden a reactivaciones del sistema hidrotermal y no a erupciones de magma juvenil, *sensu stricto*) correspondientes a 39 centros volcánicos (Petit-Breuilh, 2004). Los volcanes con mayor número de episodios eruptivos documentados en los cuatro siglos anteriores (no necesariamente aquellos que han generado las erupciones mayores), corresponden a los volcanes Villarrica, Llaima, Láscar, Antuco, Tupungatito y Cerro Azul-Quizapu. Cabe destacar que existe un sesgo del registro documentado, puesto que vastas zonas del territorio nacional estaban despobladas y por tanto sin testigos de las erupciones. Solo en el siglo XX

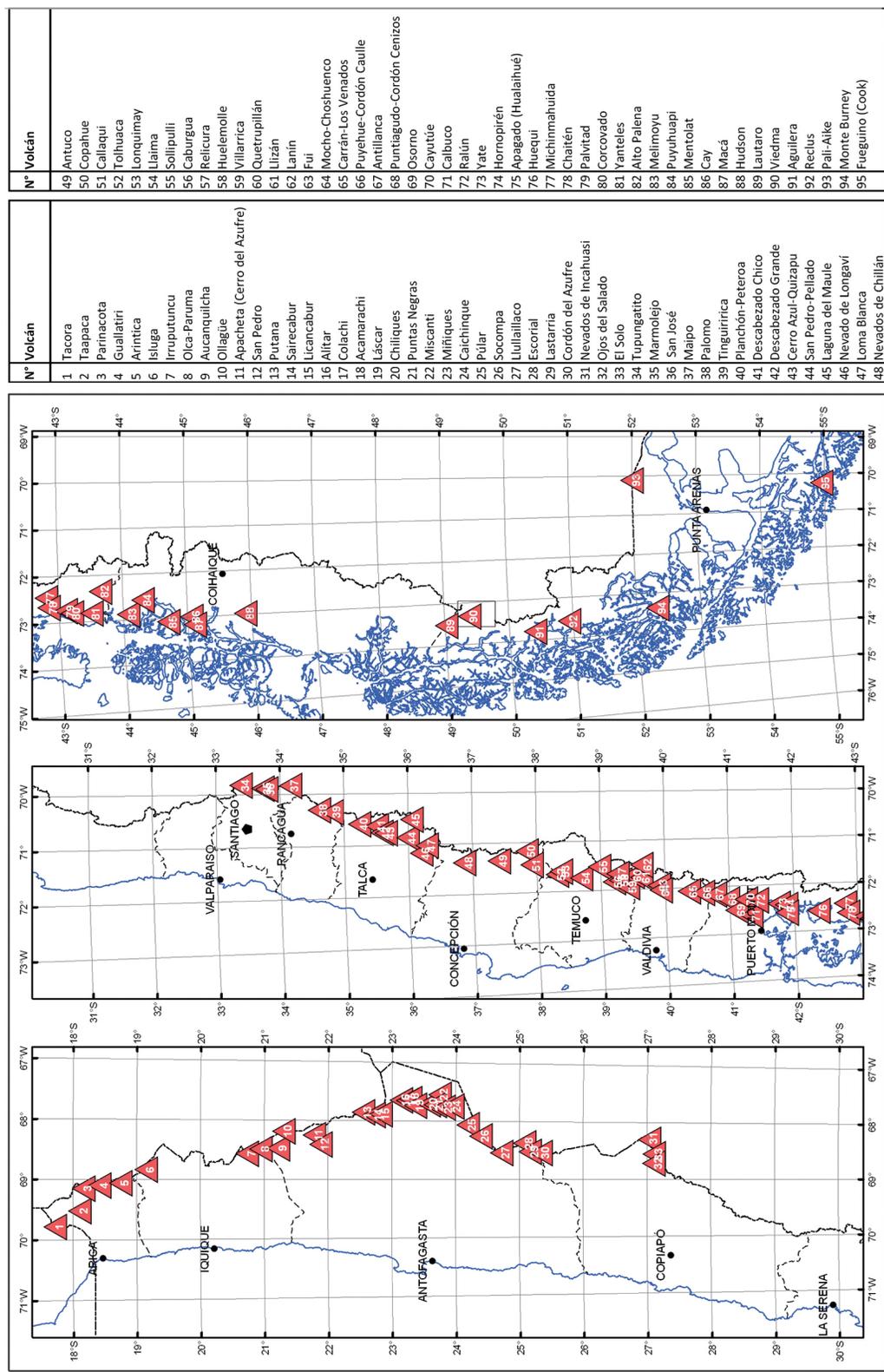


FIG. 1. Volcanes geológicamente activos de Chile continental.

ocurrieron 4 erupciones significativas (Quizapu 1932, Villarrica 1948, Hudson 1991, Láscar 1993), sobre 50 moderadas y otras tantas reactivaciones menores sin consecuencias. Desde una perspectiva más amplia, entre las erupciones importantes del siglo XX se cuentan aquella del volcán Quizapu en 1932 (Región del Maule), las del volcán Villarrica en 1948-1949 y 1964 (Región de la Araucanía); la del Cordón Caulle en 1960 (Complejo Puyehue-Cordón Caulle, Región de los Ríos), 47 horas después del gran terremoto de Valdivia; la del volcán Calbuco en 1961 (Región de los Lagos) y la del volcán Hudson en 1991 (Región de Aysén). Por otra parte, en el siglo XXI se ha registrado ya la erupción del volcán Chaitén (Región de los Lagos) iniciada en mayo de 2008 y la más reciente en el Cordón Caulle, iniciada en junio de 2011. Se estima que en Chile ocurre una erupción relevante cada 8-10 años, aunque evidentemente no existe regularidad en la frecuencia. Es destacable que las erupciones de los volcanes Quizapu y Hudson fueron, también, las de mayor magnitud en Sudamérica durante el siglo XX. Si bien los efectos de estas erupciones han sido importantes, su impacto en la sociedad no ha alcanzado los niveles observados en otras regiones del mundo como Centroamérica o el sudeste asiático. La razón fundamental es que Chile posee una baja densidad poblacional y la que se acrecienta en las cercanías de los centros volcánicos, como efecto del poblamiento concentrado en la Depresión Central y las zonas costeras. No obstante, la erupción del volcán Llaima en 1640 causó más de 300 víctimas fatales mientras la erupción del volcán Villarrica en 1948-1949 provocó 30 y aquella de 1964, otras 27. En cualquier caso, estas cifras son menores en el contexto mundial donde solo en el siglo XX fallecieron hasta 98.293 personas en 260 erupciones (Whitam, 2005; International Volcanic Health Hazard Network, www.ivhnn.org; noviembre 2011). En particular, los datos globales muestran que el mayor impacto producido por erupciones volcánicas durante el siglo XX fue producto de unas pocas erupciones altamente devastadoras. Utilizando cifras actualizadas hasta 2004, Whitman (2005) indica que Chile se ubica como el noveno país con mayor cantidad de personas evacuadas, el décimo país con mayor cantidad de personas heridas y el séptimo con mayor cantidad de incidentes producidos por eventos volcánicos en el siglo pasado (Tabla 1).

A la fecha, en Chile, los daños materiales asociados a estas erupciones no han sido sistemáticamente evaluados. En el mundo, las pérdidas económicas se han estimado en más de 3 mil millones de dólares solo en los últimos 25 años. El impacto sobre la agricultura, ganadería, turismo, energía y otros sectores, es

TABLA 1. EXTRACTO DE LA BASE DE DATOS GLOBAL (WHITAM, 2005).

Año	Fecha inicio (Día-Mes-Año)	Volcán	Víctimas fatales (Máximo reportado EM-DAT/NOAA)	Damnificados (EM-DAT)	Afectados (EM-DAT)	Daños >1M USD (GVP)	IEV
1937	09/02/1937	Llaima	3	s/i	s/i	s/i	2
1948	18/10/1948	Villarrica	100	s/i	s/i	s/i	3
1955	27/07/1955	Carrán-Los Venados	2	s/i	s/i	s/i	4
1963	21/05/1963	Villarrica	s/i	s/i	s/i	s/i	3
1964	03/03/1964	Villarrica	22	2.000	2.000	s/i	2
1971	12/08/1971	Hudson	3	s/i	s/i	s/i	3
1971	29/12/1971	Villarrica	15	s/i	s/i	s/i	2
1988	25/12/1988	Lonquimay	1	2.000	2.000	s/i	3
1991	13/08/1991	Hudson	s/i	62.000	63.200	s/i	5
1993	19/04/1993	Láscar	6	350	350	s/i	4
2008	02/05/2008	Chaitén	1	s/i	8.000	s/i	5

Fuente de la información: EM-DAT fue desarrollada por el Centre for Research on the Epidemiology of Disasters; NOAA es accesible en el sitio del National Geophysical Data Center de la National Oceanic and Atmospheric Administration de EE.UU; GVP corresponde al Global Volcanism Program de la Smithsonian Institution (www.volcano.si.edu). Detalles en www.ivhnn.org.

sin duda importante y creciente en el tiempo por cuanto el desarrollo aumenta la exposición y, consecuentemente, el riesgo (e.g., Chester *et al.*, 2000). En la actualidad, parte importante de la infraestructura crítica a nivel nacional se encuentra dentro del área expuesta, con alguna probabilidad, a las erupciones volcánicas. Asimismo, el área más densamente poblada del país coincide, también, con el segmento que incluye a los volcanes geológicamente más activos del territorio nacional y es el lugar donde más eventos volcánicos se han registrado en los últimos siglos (Fig. 2).

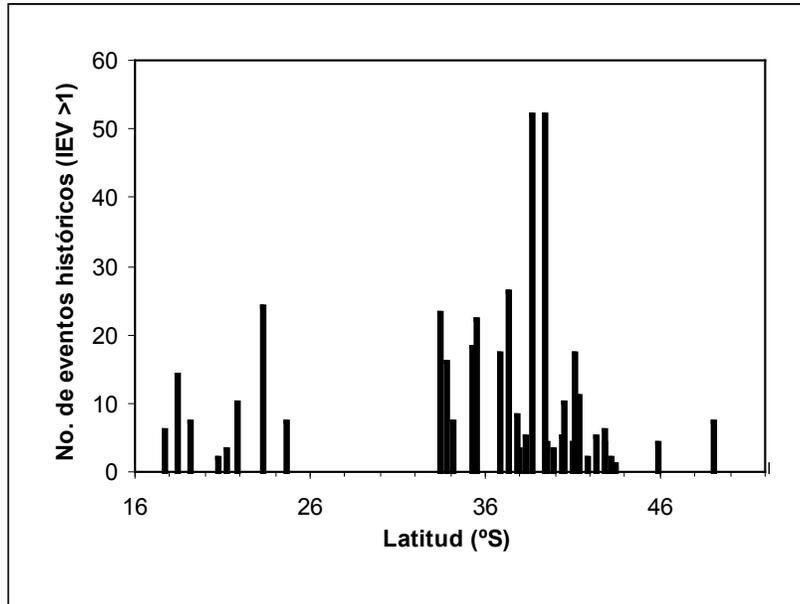


FIG. 2. Número de eventos volcánicos históricos (tomado de Petit-Breuilh, 2004) registrados, por volcán, desde el siglo XVI y representados según su posición geográfica. Nótese la mayor abundancia de reportes en la zona de Chile central (33°-42°S), la región más poblada del país.

Sin embargo, la información disponible en relación con el impacto de las erupciones históricas es escasa, particularmente en lo referido al número de víctimas fatales, personas desplazadas o pérdidas económicas relacionadas. Solo en el siglo XX habrían fallecido, al menos, 99 personas en Chile (146 según algunas bases de datos globales; e.g., Whitam, 2005) mientras, en Sudamérica, la cifra superó las 23 mil y en el mundo, las 90 mil (Fig. 3). La recurrencia de los eventos volcánicos, su distribución espacial (cerca del 20% del territorio nacional está contenido dentro de áreas susceptibles de ser afectadas de algún modo por las erupciones volcánicas) y el crecimiento de la población y la economía, determinan que la exposición e incidencia de estos procesos crezca en el tiempo (e.g., Chester *et al.*, 2000). La forma de mitigar ese efecto está generalmente asociada con la disponibilidad de mejor información geológica básica y de peligros volcánicos y mejores sistemas de vigilancia instrumental que se complementen con la política de prevención y gestión de crisis.

RIESGO VOLCÁNICO ESPECÍFICO ASOCIADO A LOS VOLCANES ACTIVOS

En Chile no existe una evaluación objetiva, formal, completa y de carácter nacional, que permita dimensionar el problema del riesgo volcánico, definir prioridades para el estudio y la instalación de redes de monitoreo instrumental y orientar la política pública en materia de ordenamiento territorial, pronóstico

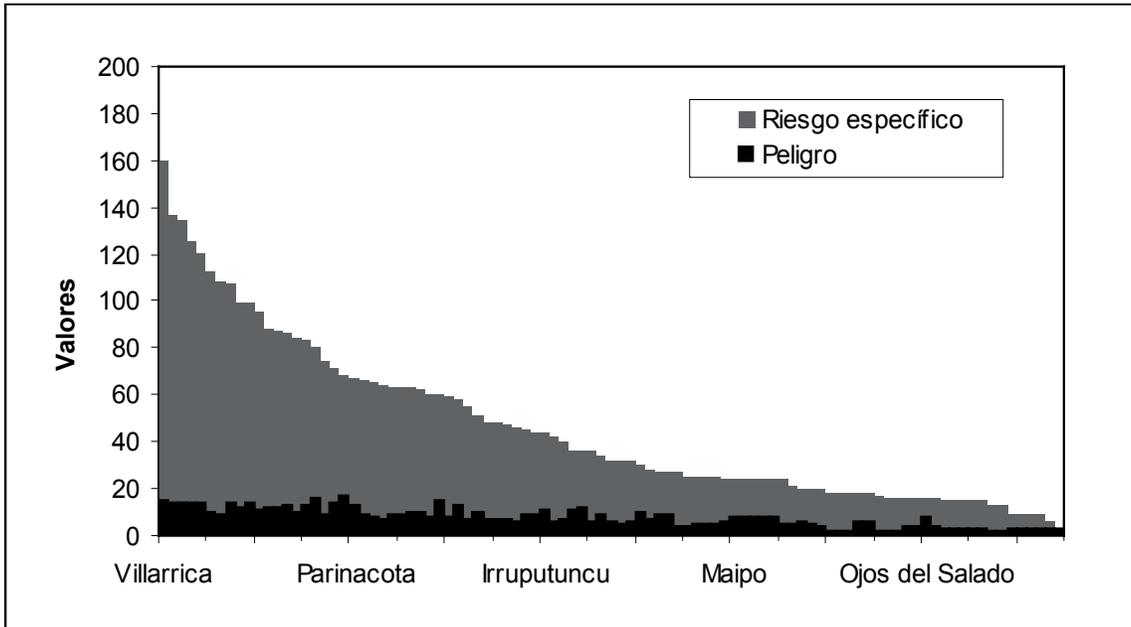


FIG. 3. Distribución del puntaje asociado a los factores de peligro (en negro) y riesgo específico (en gris) para cada uno de los 95 volcanes geológicamente activos de Chile. Los quiebres naturales han sido utilizados para definir las categorías de 'riesgo' que guían el análisis. Nótese cómo varían las distribuciones, desacoplándose el riesgo específico del peligro, lo que muestra la incidencia de los factores relacionados con la exposición (vulnerabilidad) en el resultado final.

o manejo de emergencias relacionadas con erupciones volcánicas. Algunos esfuerzos previos consistieron, básicamente, en diagnósticos internos de escala regional realizados en el ámbito de la labor de SERNAGEOMIN.

El análisis desarrollado aquí, corresponde a una actualización y extensión de algunos resultados preliminares publicados previamente (Lara *et al.*, 2006) y se relaciona con dos aspectos fundamentales: **(a)** refinamiento del catastro de volcanes activos, con reevaluación de su nivel de riesgo específico asociado; **(b)** análisis espacial del peligro, sobre la base de una zonificación obtenida cuantitativamente. El mapa fuera de texto representa solo este último aspecto, limitándose a tratar el riesgo específico como una condición intrínseca de cada volcán, manifestada en la categorización que condiciona la probabilidad relativa de cada escenario. Algunas posibles implicancias en términos de la vulnerabilidad han sido exploradas por Silva (2011).

El sistema de evaluación del riesgo específico asociado a cada volcán geológicamente activo, está basado en la consideración integrada de factores de peligro intrínseco de cada centro volcánico y factores de exposición relacionados con ellos. Este sistema corresponde a una adaptación del sistema NVEWS (National Early Warning System) desarrollado recientemente por el US Geological Survey (Ewert *et al.*, 2005; Ewert, 2007). En consecuencia, el denominado sistema NVEWS-Chile contempla una clasificación simple, estructurada sobre la base de factores de peligro volcánico como:

- Tipo de volcán.
- Máximo IEV en el Holoceno.
- Ocurrencia de actividad explosiva en los últimos 500 años.
- Recurrencia eruptiva.
- Ocurrencia en el Holoceno de flujos piroclásticos, lahares o lavas.

- Potencial de explosiones hidrotermales.
- Ocurrencia de tsunamis causados por actividad volcánica en el Holoceno.
- Potencial de colapso parcial del edificio volcánico.
- Existencia de fuente primaria de lahares (hielo/detritos).
- Actividad sísmica observable.
- Deformación de terreno observable.
- Actividad fumarólica o desgasificación magmática.

Estos parámetros se evaluaron, de acuerdo a un criterio preestablecido, a partir de información pública o inédita disponible, y la suma de ellos origina un puntaje asociado al peligro volcánico, para cada centro eruptivo considerado (Anexo II, Tabla 1). Por otra parte, la exposición o vulnerabilidad se ha evaluado considerando los siguientes factores cuyo detalle se explica en el Anexo II, Tabla 2:

- Población contenida en un radio de 30 km
- Población contenida en la envolvente de peligro volcánico
- Víctimas fatales históricas
- Evacuaciones históricas
- Exposición aeronáutica local y regional
- Presencia de infraestructura energética
- Presencia de infraestructura de transporte
- Presencia de desarrollos urbanos mayores o áreas ecológicamente sensibles
- Presencia de islas volcánicas

La evaluación de los parámetros relacionados con la exposición del territorio reviste mayor complicación. En primer lugar, se construyó una base de datos demográficos a partir del Censo de 2002 (INE, 2002), desagregados por unidad censal y considerando las diferentes entidades demográficas. Información relativa a la infraestructura y otros aspectos fue también extraída de bases de datos institucionales y analizada directamente. La suma de los puntajes asociados al peligro y exposición, respectivamente, entrega un valor del riesgo específico antes de considerar la capacidad de mitigación o los costos económicos y ofrece un diagnóstico previo a la intervención de una política pública (Fig. 3).

El resultado de este análisis permite reconocer, arbitrariamente, cinco categorías básicas de volcanes activos, en que los más riesgosos se sitúan en el segmento centro-sur del país, en particular entre las regiones del Maule y de Los Lagos. En el norte, se presentan 2 casos en las categorías superiores, mientras que en el sur alcanzan a 11. En parte, este resultado se origina en la distribución de la población residente y en la infraestructura mayor amenazada aunque, afortunadamente, la población muestra un decrecimiento sostenido de su densidad, según disminuye la distancia radial a cada volcán activo. Esta situación es radicalmente diferente en otras regiones del mundo, como el sudeste asiático o Centroamérica (Small y Naumann, 2001), lo que explica también la magnitud de algunas catástrofes históricas ocurridas en esas áreas.

Las conclusiones comentadas, en principio probablemente intuitivas, permiten establecer un sistema de evaluación semicuantitativo de la amenaza, el que puede actualizarse periódicamente según la información disponible. En una fase siguiente, los parámetros evaluados podrán ampliarse o adaptarse a información más específica (*e.g.*, tráfico aéreo, población flotante, flujos migratorios y comerciales, entre otros) con el objeto de producir resultados sintéticos más precisos, organizados y adecuados para la generación de políticas sectoriales de ordenamiento territorial y prevención de desastres, así como otras políticas públicas de impacto regional y nacional.

Un problema general en los sistemas prospectivos del riesgo, es la elección de los escenarios eruptivos por considerar. Por esta razón, siguiendo la metodología propuesta por Mastin *et al.* (2010), se ha complementado el catastro de volcanes agregando, a cada volcán, un atributo que describe el escenario eruptivo más probable en su grado máximo, según el registro geológico (Anexo II, Tabla 3). Mastin *et al.*

(2010) realizaron un levantamiento global de los parámetros eruptivos, proponiendo una categorización que, en primer lugar, distingue dos tipologías que aluden a la participación de magmas silíceos o máficos, para las cuales se definen diferentes niveles de explosividad, de acuerdo con la magnitud esperada (Tabla 2).

Evidentemente, el comportamiento eruptivo de un volcán individual es variable en el tiempo y sus episodios eruptivos describen una relación entre la magnitud (o el Índice de Explosividad Volcánica) y la frecuencia, similar a la ley de Gutenberg-Richter que relaciona la frecuencia y la magnitud de los sismos, estableciendo que las erupciones menores son generalmente más frecuentes que las de mayor magnitud. A partir del registro geológico, es posible identificar aquellos episodios más severos, asimilándolos a algunos de los escenarios eruptivos caracterizados por Mastin *et al.* (2010). Pero a diferencia de estos autores, que asignan a cada volcán del catálogo global del Global Volcanism Network un escenario eruptivo basado en su actividad histórica, aquí se ha optado por considerar todo el registro holoceno. En varios casos, el escenario eruptivo asignado en este trabajo es más severo que aquel propuesto por Mastin *et al.* (2010) basado en datos históricos publicados. Por último, para cada escenario definido, se han capturado los parámetros eruptivos que lo representan y sobre esa base se ha realizado el análisis de peligros (mapa fuera de texto).

ZONIFICACIÓN DEL PELIGRO VOLCÁNICO A ESCALA NACIONAL

Existen numerosas formas de evaluar y zonificar espacialmente el peligro volcánico, las que, en términos generales, dependen del objetivo y la escala elegida. Una aproximación común es la realización de mapas de peligro volcánico, basados en la distribución de los productos emplazados durante erupciones previas. En Chile se han publicado documentos de este tipo para los volcanes Planchón-Peteroa, Llaima, Villarrica, Mocho-Choshuenco, Osorno y Calbuco (*e.g.*, Naranjo *et al.*, 1999; Moreno y Naranjo, 2005; Moreno, 2000; Moreno y Naranjo, 2006; Moreno, 1999a, Moreno, 1999b). Generalmente, esta metodología produce una zonificación del peligro a la escala del volcán, fundada en los escenarios más adversos identificados, a veces la suma de ellos generando, en consecuencia, una sobreestimación del peligro. Actualmente, existen métodos cuantitativos para definir las áreas que podrían ser afectadas por la caída de piroclastos en condiciones meteorológicas específicas, así como algoritmos que permiten identificar con objetividad los sectores susceptibles de ser afectados por procesos característicos del área proximal o distal (*e.g.*, Iverson *et al.*, 1998; Bonadonna *et al.*, 2005; Byrne *et al.*, 2007; Schilling, 1998).

TABLA 2. TIPOLOGÍA DE ERUPCIONES VOLCÁNICAS PROPUESTA POR MASTIN ET AL. (2010) Y PARÁMETROS ERUPTIVOS PRINCIPALES.

Tipo	Altura columna (km)	Duración (h)	Tasa de emisión (kg/s)	Volumen (km ³)
M0, máfica estándar	7	60	1x10exp5	0,01
M1, máfica menor	2	100	5x10exp3	0,001
M2, máfica moderada	7	60	1x10exp5	0,01
M3, máfica mayor	10	5	1x10exp6	0,17
S0, silícea estándar	11	3	4x10exp6	0,015
S1, silícea menor	5	12	2x10exp5	0,003
S2, silícea moderada	11	3	4x10exp6	0,015
S3, silícea mayor	15	8	1x10exp7	0,15

En este trabajo, se han modificado parcialmente los atributos de cada tipo, utilizando como representativas las erupciones ocurridas principalmente en Chile.

CAÍDA DE PIROCLASTOS: ÁREA DE IMPACTO PROXIMAL Y DISTAL

La dispersión y caída de piroclastos es un proceso controlado tanto por la dinámica del evento eruptivo como por las condiciones meteorológicas imperantes en la atmósfera cercana. Los modelos numéricos más comunes para el pronóstico de la trayectoria que seguirán las partículas, son aquellos de advección-difusión, que integran la velocidad del viento y la difusión atmosférica como control primario de la dispersión. A su vez, la sedimentación de partículas en la superficie es controlada por la velocidad terminal de las partículas y los procesos de agregación entre ellas. En este caso, se modeló utilizando un enfoque semi cuantitativo que se inicia con la definición del escenario eruptivo más probable para cada volcán, al cual se asocia una única combinación de parámetros eruptivos según lo observado en erupciones reales. Las erupciones escogidas para cada escenario, así como sus características principales, son las siguientes (Anexo II, Tabla 4):

- M1, máfica menor: Lonquimay 1988 (Moreno y Gardeweg, 1989)
- M2, máfica moderada: Hudson, primera fase, agosto 1991 (Naranjo *et al.*, 1993)
- M3, máfica mayor: Fuego, 1974 (Guatemala) (Rose *et al.*, 2007)
- S1, silíceo menor: Láscar, abril 1993 (Déruelle *et al.*, 1996)
- S2, silíceo moderado: Chaitén 2008 (Alfano *et al.*, 2010)
- S3, silíceo mayor: Hudson, segunda fase, diciembre 1991 (Naranjo *et al.*, 1993)

Para cada uno de estos ciclos eruptivos, representados por sus correspondientes depósitos, se ha digitalizado la isópaca de 1 cm de espesor, considerada representativa del umbral de daño potencial que puede asociarse con este proceso a la escala de trabajo (espesores inferiores provocarían daños controlables y menos persistentes; espesores mayores generan distorsiones al menos temporales en el área afectada). Las condiciones de circulación atmosférica han sido extraídas del proyecto Reanálisis II (Kanamitsu *et al.*, 2002), que es la única fuente de información atmosférica en altura disponible para cada región del país. Con el objetivo de lograr una mejor representación temporal y reflejar la influencia de las variaciones estacionales y/o interanuales en los cálculos, se consideraron 10 años de información y se generaron diagramas de frecuencia trimestrales, a partir de los cuales se obtuvo la moda y sobre la base de ella, se definió el eje de dispersión. Cada uno de estos ejes permitió orientar, espacialmente, la isópaca de 1 cm correspondiente a la erupción patrón escogida para cada caso. En varios casos, este procedimiento generó superposiciones que reflejan la probabilidad relativa de cada escenario y, consecuentemente, se construyó una nueva escala utilizando como ponderador el factor de peligro volcánico intrínseco de cada volcán (Anexo II, Tabla 3). Con estos valores se generó la zonificación de peligros volcánicos propuesta (Anexo II, Tabla 3 y mapa fuera de texto), que tiene implícita una noción de probabilidad relativa de ocurrencia. Así, las áreas de alto peligro corresponden a zonas donde existe mayor susceptibilidad de ser afectadas por caída de piroclastos, como consecuencia de erupciones de diferente tipo en la región (y en algunos casos como consecuencia de erupciones en los volcanes vecinos). A esta zonificación se asocia una serie de recomendaciones generales, basadas en la experiencia internacional (*e.g.*, IAVCEI en <http://www.iavcei.org/>; noviembre 2011).

LAVAS, LAHARES, FLUJOS PIROCLÁSTICOS Y AVALANCHAS VOLCÁNICAS: ÁREA DE IMPACTO PROXIMAL

El edificio volcánico y su entorno inmediato es, intuitivamente, el área más expuesta a las consecuencias de erupciones volcánicas de diferente magnitud. En el dominio proximal, los sectores susceptibles de ser afectados por flujos de lava son también sensibles al impacto de lahares y flujos piroclásticos, por cuanto todos corresponden a corrientes controladas por la gravedad, cuyo desplazamiento depende de la energía potencial. Sin embargo, por tratarse de procesos controlados por mecanismos de flujo diferentes, su movilidad es también distinta. Así, los flujos piroclásticos de mayor volumen, generados por colapso de columnas eruptivas plinianas o subplinianas, pueden exceder los cauces y superar barreras topográficas y extenderse

más allá del edificio volcánico. Asimismo, los lahares se movilizan en función del volumen y proporción relativa de agua y material detrítico que transportan, propagándose más allá de las zonas alcanzadas por las coladas de lava. En consecuencia, existen diferentes herramientas numéricas apropiadas para la modelación del flujo e inundación asociado a cada uno de estos procesos (para una revisión de estas herramientas ver <http://vhub.org/>), gran parte de ellas desarrolladas para un análisis de detalle a la escala del edificio volcánico. Sin embargo, a la escala de este trabajo, las herramientas anteriores producirían un nivel de detalle difícil de integrar y, por lo tanto, se ha optado por utilizar una estrategia más simple pero también cuantitativa, basada en el concepto de 'línea' o 'cono de energía', introducido tempranamente por Malin y Sheridan (1982). Este procedimiento se basa en la relación existente entre la altura de inicio (H) del flujo y el máximo alcance o 'runout' del mismo (L). En principio, existe una relación inversa entre el cociente H/L y el volumen de un depósito, además de un valor característico de H/L para cada tipo de flujo granular. No obstante, Hayashi y Self (1992) demostraron que la movilidad de las avalanchas volcánicas y flujos piroclásticos sería similar en términos de sus mecanismos de flujo y que el alcance de ellos estaría determinado, finalmente, por su volumen y las propiedades físicas del material transportado. Para avalanchas de otro origen, Hayashi y Self (1992) obtuvieron valores de H/L entre 0,09 y 0,58 mientras que para avalanchas volcánicas el rango es 0,05 a 0,17 y para flujos piroclásticos 0,07 a 0,52. Así, para el análisis a gran escala presentado en este trabajo, se han escogido valores de H/L (corregida la altura cuando se trata de edificios truncados; Anexo II, Tabla 3) entre 0,05 y 0,2, siendo los valores más comunes 0,15 y 0,1. El valor de H/L elegido para cada volcán fue aquel que mejor representa la distribución de sus productos, basándose en datos de campo, imágenes satelitales o en los antecedentes provistos en la literatura. En el caso de centros distribuidos o conjuntos de conos monogénicos, se generaron varios conos H/L, partiendo desde los edificios más altos o dominantes del grupo y el resultado fue consistente con la distribución de los productos holocenos. Para avalanchas volcánicas y flujos piroclásticos, estos valores reproducen, de buena forma, el área proximal afectada por estos procesos (disponible en estudios de detalle para un número limitado de volcanes), con excepción del efecto asociado a escenarios extremos caracterizados por volúmenes mayores. La simulación fallaría, parcialmente, al sobreestimar el efecto en las laderas del basamento cercano al edificio volcánico, aunque ellas, efectivamente, podrían aún ser alcanzadas por flujos y oleadas piroclásticas de menor volumen dada su alta movilidad. Por otra parte, los modelos subestimarían el impacto en los cauces al generar máximos 'runout' inferiores a 30 km, valor ocasionalmente excedido por lahares y flujos piroclásticos de mayor volumen. Sin embargo, la aproximación aún es robusta a esta escala, por cuanto el registro global muestra que un alto porcentaje de los efectos directos de las erupciones volcánicas ocurre en un radio de 30 km en torno del centro emisor y muy escasos eventos han superado los 50 km (Blong, 1984). Asimismo, Newhall y Hoblitt (2002) muestran que para erupciones significativas de IEV 4-5, los flujos piroclásticos tienen una probabilidad no superior al 5% de exceder ese radio, mientras que la probabilidad de acumulación de más de 10 cm de tefra, dentro de ese dominio, es ca. 10% para erupciones de IEV 3 y alrededor de 80% para erupciones de IEV 4. Además, para reflejar el escenario de menor probabilidad de ocurrencia, se ha trazado un radio externo de 40 km, que incluiría aquellas áreas potencialmente afectadas por procesos de gran movilidad y/o de elevado volumen.

CONCLUSIONES

Con las restricciones propias de la metodología empleada, la delineación de las áreas susceptibles de ser afectadas por los procesos volcánicos más comunes es consistente con la mayor parte de las observaciones. En efecto, existe una buena coincidencia entre las áreas de impacto por lavas y lahares, consignadas en los mapas escala 1:100.000 disponibles y el resultado obtenido en este trabajo. Solo los eventos catastróficos parecen exceder el cono H/L utilizado en la definición de las áreas de alto peligro aunque, en todo caso, con poca frecuencia superan el radio de 40 km usado para definir las áreas de bajo peligro. La dispersión y acumulación de material piroclástico muestra, en la zona norte del país, una distribución menos intuitiva,

por cuanto captura la variación estacional del régimen de circulación atmosférica. No obstante, el registro geológico confirma la ocurrencia de eventos de caída de ceniza, incluso en la zona costera del norte grande.

Los resultados obtenidos ofrecen un nuevo catálogo de volcanes geológicamente activos, que alcanzan un total de 95 incluyendo estratovolcanes, calderas y grupos de conos piroclásticos. El sistema de clasificación de ellos en términos del riesgo específico asociado permite, entre otras cosas, comprender la variabilidad espacial del problema y el consecuente impacto que las erupciones volcánicas pudieran causar.

Por otra parte, la metodología empleada ha permitido delinear, de manera objetiva, las áreas de peligro volcánico asociadas con flujos de lava, lahares y flujos piroclásticos, en la zona proximal, así como los sectores susceptibles de ser afectados por la dispersión y acumulación de material piroclástico, tanto cerca de los centros emisores como en las áreas distales. El resultado integrado indica que alrededor de un 20% del territorio nacional es susceptible de ser afectado por erupciones volcánicas de diferente magnitud.

En consecuencia, esta información debe ser integrada en el diseño de políticas públicas orientadas a la mitigación del impacto por erupciones volcánicas e incorporada en los instrumentos de planificación correspondientes. No obstante lo anterior, debe entenderse que el resultado presentado aquí es una aproximación de primer orden, válido a escala nacional, que no debe trasladarse mecánicamente a escalas de mayor detalle. En todo caso, ciertas recomendaciones generales son válidas tanto respecto de la restricción sobre la infraestructura pública mayor en las zonas de alto peligro proximal, como de la promoción de medidas de mitigación tales como la vigilancia instrumental, la disponibilidad de mapas de peligro volcánico a escalas adecuadas y la implementación de planes de contingencia conocidos por la comunidad. Asimismo, para las áreas de peligro por caída de piroclastos, los instrumentos de planificación deberían considerar esta condición y promover medidas de mitigación adicionales, como la disponibilidad de sistemas de alerta para la aeronavegación y normas de construcción adecuadas como techumbres inclinadas, reservas de agua, entre otros.

AGRADECIMIENTOS

J.W. Ewert (USGS), desarrollador del sistema NVEWS en EE.UU., ha compartido gentilmente su experiencia y ha estimulado la discusión sobre los temas abordados en este informe. Los editores R. Wall, A. Gajardo y S. Sepúlveda realizaron valiosos comentarios que permitieron mejorar este trabajo. C. Silva Briones ha trabajado en una actualización del catálogo de volcanes con el objetivo de evaluar la vulnerabilidad del territorio. J. Clavero, R. Wall y S. Huerta colaboraron parcialmente en la etapa embrionaria de este proyecto. Esta es una contribución del Programa de Riesgo Volcánico de SERNAGEOMIN.

REFERENCIAS

- Alfano, F.; Bonadonna, C.; Volentik, A.C.M.; Connor, C.B.; Watt, S.F.L.; Pyle, D.M.; Connor, L.J. 2010. Tephra stratigraphy and eruptive volume of the May, 2008, Chaitén eruption, Chile. *Bulletin of Volcanology*. doi: 10.1007/s00445-010-0428-x.
- Blong, R.J. 1984. *Volcanic Hazards, a source book on the effects of eruptions*. Academic Press, Sydney: 424 p. Australia.
- Byrne, M.A.; Laing, A.G.; Connor, C.B. 2007. Predicting tephra dispersion with a mesoscale atmospheric model and a particle fall model: Application to Cerro Negro volcano. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 46: 121-135.
- Bonadonna, C.; Connor, C.B.; Houghton, B.F.; Connor, L.; Byrne, M.; Laing, A.G.; Hincks, T.K. 2005. Probabilistic modeling of tephra dispersal: Hazard assessment of a multiphase rhyolitic eruption at Tarawera, New Zealand. *Journal of Geophysical Research*. doi: 10.1029/2003JB002896.
- Chester, D.K.; Degg, M.; Duncan, A.M.; Guest, J.E. 2000. The increasing exposure of cities to the effects of volcanic eruptions: a global survey. *Environmental Hazards* 2: 89-103.

- Déruelle, B.; Figueroa, O.; Medina, E.; Viramonte, J.; Maragno, M. 1996. Petrology of pumice of April 1993 eruption of Lascar (Atacama, Chile). *Terra Nova* 8: 191-199.
- Ewert, J. 2007. System for Ranking Relative Threats of US Volcanoes. *Natural Hazards Review* 8: 112-124.
- Ewert, J.; Guffanti, M.; Murray, T. 2005. An Assessment of Volcanic Threat and Monitoring Capabilities in the United States: Framework for a National Volcanic Early Warning System (NVEWS). United States Geological Survey, Open-File Report 1164: 1-62.
- Global Volcanism Program, Smithsonian Institution. <http://www.volcano.si.edu/>; noviembre 2011.
- González-Ferrán, O. 1995. Volcanes de Chile. Instituto Geográfico Militar: 640 p. Santiago.
- Hayashi, J.N.; Self, S. 1992. A comparison of pyroclastic flow and avalanches mobility. *Journal of Geophysical Research* 97 (B6): 9063-9071.
- VHUB. Collaborative Volcano Research. <http://vhub.org/>.
- International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior (IAVCEI). www.iavcei.org/; noviembre 2011.
- Instituto Nacional de Estadísticas (INE). 2002. Censo de población y vivienda 2002. www.ine.cl/; noviembre 2011.
- International Volcanic Health Hazard Network. www.ivhnn.org/; noviembre 2011.
- Iverson, R.M.; Schilling, S.P.; Vallance, J.W. 1998. Objective delineation of lahar-inundation hazard zones. *Bulletin of the Geological Society of America* 110: 972-984.
- Kanamitsu, M.; Ebisuzaki, W.; Woollen, J.; Yang, S.K.; Hnilo, J.J.; Fiorino, M.; Potter, G.L. 2002. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bulletin of American Meteorology Society* 83 (11): 1631-1643.
- Lara, L.E.; Clavero, J.; Hinojosa, M.; Huerta, S.; Wall, R.; Moreno, H. 2006. NVEWS-Chile: sistema de clasificación semi cuantitativa de la vulnerabilidad volcánica. *In Congreso Geológico Chileno No. 11, Actas CD-ROM. Antofagasta.*
- Malin, S.; Sheridan, S. 1982. Computed-assisted mapping of pyroclastic surges. *Science* 217: 637-639.
- Mastin, L.G.; Guffanti, M.; Servranckx, R.; Webley, P.; Barsotti, S.; Dean, K.; Durant, A.; Ewert, J.W.; Neri, A.; Rose, W.I.; Schneider, D.; Siebert, L.; Stunder, B.; Swanson, G.; Tupper, A.; Volentik, A.; Waythomas, C.F. 2010. A multidisciplinary effort to assign realistic source parameters to models of volcanic ash-cloud transport and dispersion during eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2009.01.008.
- Moreno, H. 1999a. Mapa de peligros del volcán Osorno, Región de Los Lagos. Servicio Nacional de Geología y Minería, Serie Documentos de Trabajo No. 11, 1 mapa escala 1:75.000.
- Moreno, H. 1999b. Mapa de peligros del volcán Calbuco, Región de Los Lagos. Servicio Nacional de Geología y Minería, Serie Documentos de Trabajo No. 12, 1 mapa escala 1:75.000.
- Moreno, H. 2000. Mapa de peligros del volcán Villarrica, regiones de La Araucanía y de Los Lagos. Servicio Nacional de Geología y Minería, Serie Documentos de Trabajo No. 17, 1 mapa escala 1:75.000.
- Moreno, H.; Gardeweg, M. 1989. La erupción reciente en el Complejo Volcánico Lonquimay (Diciembre 1988), Andes de Sur. *Revista Geológica de Chile* 26 (1): 93-117.
- Moreno, H.; Naranjo, J. 2005. Mapa de Peligros del volcán Llaima: región de La Araucanía. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental 7, 1 mapa escala 1:100.000.
- Moreno, H.; Naranjo, J. 2006. Peligros del Complejo Volcánico Mocho-Choshuencho, Región de Los Lagos. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental 9, 1 mapa escala 1:50.000.
- Naranjo, J.A.; Moreno, H.; Banks, N.G. 1993. La erupción Del Volcán Hudson en 1991 (46°S), Región XI, Aysén, Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín 44: 50 p.
- Naranjo, J.A.; Haller, M.J.; Ostera, H.A.; Pesce, A.H.; Sruoga, P. 1999. Geología y peligros del Complejo Volcánico Planchón-Peteroa, Andes del Sur (35°15'S), Región del Maule, Chile-Provincia de Mendoza, Argentina. Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín 52: 55 p.
- Newhall, C.; Self, S. 1982. The Volcanic Explosivity Index (VEI): An estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *Journal of Geophysical Research* 87: 1231-1238.
- Newhall, C.; Hoblitt, R.P. 2002. Constructing event trees for volcanic crises. *Bulletin of Volcanology* 64: 3-20.
- Petit-Breuilh, M.E. 2004. La historia eruptiva de los volcanes hispanoamericanos (Siglos XVI al XX). Servicio de Publicaciones del Exmo. Cabildo Insular de Lanzarote-Casa de los volcanes: 431 p.
- Pyle, D.M. 2000. Sizes of volcanic eruptions. *In Encyclopedia of Volcanoes* (Sigurdsson, H.; editor). Academic Press: 463-475. San Diego.

- Rose, W.; Self, S.; Murrow, P.J.; Bonadonna, C.; Durant, A.J.; Ernst, G.G.J. 2007. Nature and significance of small volume fall deposits at composite volcanoes: insights from the October 14, 1974 Fuego eruption, Guatemala. *Bulletin of Volcanology*. doi:10.1007/s00445-007-0187-5.
- 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.
- Slocum, T.A. 1999. *Thematic cartography and visualization*. Prentice Hall: 288 p. New Jersey.
- Siebert, L.; Simkin, T.; Kimberley, P. 2010. *Volcanoes of the World (3rd edition)*. Smithsonian Institution and University of California Press, Los Angeles.
- Silva, C. 2011. *Evaluación objetiva del peligro volcánico y vulnerabilidad del territorio nacional*. Memoria de título (Inédito), Departamento de Geografía, Universidad de Chile: 100 p. Santiago.
- Simkin, T.; Siebert, L. 1994. *Volcanoes of the world*. Geoscience Press: 349 p. Tucson.
- Small, C.; Naumann, T. 2001. The global distribution of human population and recent volcanism. *Environmental Hazards* 3: 93-109.
- Stern, C.R. 2004. Active Andean volcanism: its geologic and tectonic setting. *Revista Geológica de Chile* 31 (2): 161-206.
- Stern, R.S.; Moreno, H.; López-Escobar, L.; Clavero, J.; Lara, L.E.; Naranjo, J.A.; Parada, M.A.; Skewes, M.A. 2007. Chilean volcanoes. *In* *Geology of Chile* (Moreno, T.; Gibbons, W.; editors). The Geological Society of London: 147-178.
- United Nations Disaster Relief Organization (UNDRO). 1979. *Natural Disasters and Vulnerability Analysis*. Report of Experts Group Meeting (9-12 July 1979), Geneva.
- Witham, C.S. 2005. Volcanic disasters and incidents: A new database. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 148 (3-4): 191-233.
- Wood, N.; Soulard, C. 2009. Variations in population exposure and sensitivity to lahar hazards from Mount Rainier, Washington. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 188 (4): 367-378.

ANEXOS

I. ANTECEDENTES METODOLÓGICOS

II. MEMORIA DE CÁLCULO

Tabla 1. Factores de peligro, exposición y riesgo específico para los volcanes activos de Chile.

Tabla 2. Memoria explicativa de los criterios para asignar valores a los factores de peligro y exposición.

Tabla 3. Parametrización de los volcanes de Chile para estimación de sus áreas de peligro.

Tabla 4. Categorías de erupciones esperadas.

ANEXO I**ANTECEDENTES METODOLÓGICOS****CATÁLOGO DE VOLCANES Y EVALUACIÓN DEL RIESGO ESPECÍFICO**

A partir del criterio establecido por Ewert *et al.* (2005), el catálogo de volcanes activos de Chile fue refinado. Complementariamente, los factores de peligro y exposición (Anexo II, Tabla 1) fueron evaluados para cada volcán de acuerdo a los criterios definidos por ese autor y presentados explícitamente en la Tabla 2 del mismo anexo. El resultado numérico de esta evaluación representa el riesgo específico asociado a cada uno de ellos. Esos valores fueron utilizados posteriormente para construir un sistema de clasificación donde las categorías fueron obtenidas usando el criterio de los quiebres naturales de la distribución (Algoritmo de Fisher-Jenks; e.g., Slocum, 1999). Las categorías resultantes fueron utilizadas exclusivamente como criterio selectivo en el análisis de peligro volcánico descrito en la sección siguiente.

EVALUACIÓN DEL PELIGRO VOLCÁNICO

Para identificar las áreas susceptibles de ser afectadas por los diferentes procesos volcánicos, se realizó un análisis cuantitativo utilizando una metodología específica para cada caso que se describe a continuación:

LAVAS, LAHARES, AVALANCHAS VOLCÁNICAS Y FLUJOS PIROCLÁSTICOS EN EL ÁREA PROXIMAL

- Verificación del escenario eruptivo probable M1 a S3.
- Verificación de la morfología del edificio; si corresponde a un cono truncado se suma la altura que reconstruye el edificio.
- Trazado automático de H/L sobre modelo de elevación Aster GDEM, utilizando el modelo numérico LAHARZ (Schilling, 1998). El valor de H/L finalmente elegido fue aquel que mejor ajustaba la distribución de las rocas y depósitos volcánicos holocenos según puede establecerse a partir de los datos de campo, imágenes satelitales o literatura científica disponible.
- Trazado automático de buffer a 40 km para estratovolcanes y 10 km para grupos de conos monogénicos.
- Generalización y depuración manual de polígonos.
- Unión de áreas y construcción de leyenda.

CAÍDA DE PIROCLASTOS EN EL ÁREA PROXIMAL Y DISTAL

- Verificación del escenario eruptivo probable M1 a S3.
- Compilación y digitalización de isópacas de 1 cm para erupciones representativas de los escenarios probables.
- Corrección de isópacas según sus parámetros espaciales y transformación en elipses de área característica.
- Verificación de la elevación del edificio y altura de la columna esperada para el escenario asignado.
- Selección del dominio de vientos según zona geográfica.
- Elección de la altura local y procesamiento estadístico para definición del eje de dispersión trimestral más frecuente.
- Orientación de isópacas según cada eje de dispersión.
- Intersección de áreas y construcción de histograma de frecuencias.
- Unión de áreas y generalización controlada.
- Edición cartográfica manual (eliminación de inconsistencias o problemas gráficos) y construcción de leyenda.

TABLA 2. MEMORIA EXPLICATIVA DE CRITERIOS PARA ASIGNAR VALORES A LOS FACTORES DE PELIGRO Y EXPOSICIÓN.

Factores de peligro	Puntaje
Tipo de volcán (0, 1)	
Si el volcán es un cono de piroclastos, un pequeño volcán de escudo o un centro fisural (tipo 1)	0
Si el volcán es un estratocono, domo, complejo volcánico, maar o caldera (tipo 2)	1
Máximo IEV	
Si el máximo IEV conocido es ≤ 2	0
Si el máximo IEV conocido es 3 o 4	1
Si el máximo IEV conocido es 5 o 6	2
Si el máximo IEV conocido es ≥ 7	3
Si ningún valor máximo de IEV es consignado por Global Volcanism Program o el volcán es tipo 1	0
Si ningún valor máximo de IEV es consignado por Global Volcanism Program o el volcán es tipo 2	1
Si el volcán no tiene erupciones conocidas en el Holoceno y no es una caldera	0
Actividad explosiva <500 años	
Si existe evidencia de actividad explosiva con IEV ≥ 3 en los últimos 500 años	1
Actividad explosiva mayor <5.000 años	
Si existe evidencia de actividad explosiva con IEV ≥ 4 en los últimos 5.000 años	1
Recurrencia eruptiva	
Si el intervalo entre erupciones es 1-99 años	4
Si el intervalo entre erupciones es 100-1.000 años	3
Si el intervalo entre erupciones es de 1.000 a varios miles de años	2
Si el intervalo entre erupciones es de 5.000-10.000 o no existe evidencia de erupciones holocenas pero es un sistema silíceo activo en los últimos 100.000 años	1
Si no hay evidencia de erupciones holocenas	0
Ocurrencia de flujos piroclásticos en el Holoceno	
Si han ocurrido flujos piroclásticos en los últimos 10.000 años	1
Ocurrencia de lavas en el Holoceno	
Si las lavas holocenas han escurrido más allá de los flancos del volcán y afectado áreas pobladas	1
Ocurrencia de lahares en el Holoceno	
Si las lahares holocenas han viajado más allá de los flancos del volcán y afectado áreas pobladas	1
Ocurrencia de tsunamis en el Holoceno	
Si algún tsunami ha sido generado en el Holoceno	1
Potencial de explosiones hidrotermales	
Si el volcán ha tenido erupciones freáticas y/o tiene manifestaciones geotermales extendidas	1
Potencial de colapso de flanco	
Si el volcán ha colapsado alguna vez en el Cuaternario y ha sido reconstruido o si tiene un relieve empinado, flancos abruptos o alteración	1
Potencial de generación de lahares	
Si el volcán tiene una fuente permanente de agua/hielo con volumen de agua $>106 \text{ m}^3$	1
Actividad sísmica	
Si se registra actividad sísmica desde la última erupción, en ausencia de actividad eruptiva y en un radio 20 km del edificio volcánico	1
Deformación	
Si se registra deformación del terreno desde la última erupción, en ausencia de actividad eruptiva, u otra evidencia de inyección de magma	1
Desgasificación	
Si se registra actividad fumarólica desde la última erupción, en ausencia de actividad eruptiva, sea de origen hidrotermal o magmático	1

continuación tabla 2.

Factores de exposición (vulnerabilidad)	Puntaje
Población en zona de alto peligro	
Log10 del número de habitantes en un radio de 30 km en torno del volcán	Log10 (n)
Población en zona distal	
Log10 del número de habitantes más allá del radio de 30 km pero incluida en el área afectada o susceptible de ser afectada por lahares (solo para volcanes con peligro declarado de lavas y lahares)	Log10 (n)
Víctimas fatales	
Si hay registro de víctimas fatales en tiempos históricos y aun existe población residente en esas áreas	1
Evacuaciones	
Si hay registro de evacuaciones en tiempos históricos y aun existe población residente en esas áreas	1
Exposición de la aviación local	
Si existe un aeropuerto o aeródromo a menos de 50 km del volcán	1
Si el volcán es tipo 1 y existe un aeropuerto o aeródromo en un radio de 300 km	1
Si el volcán es tipo 1 y existe un aeropuerto internacional en un radio de 300 km	2
Exposición de la aviación regional	
Log10 del número de pasajeros diarios. En ausencia de información se asume un valor común nulo	0
Infraestructura energética	
Si existe una instalación energética (planta de generación, línea de transmisión, etc.) en un área de alto peligro o que sea altamente susceptible de ser afectada por la caída de piroclastos	1
Infraestructura de transportes	
Si existe alguna obra de ingeniería que preste servicios de transporte y conectividad (puerto, carretera, etc.) en un área de alto peligro o que sea altamente susceptible de ser afectada por la caída de piroclastos	1
Áreas de desarrollo o protección	
Si existe alguna zona de desarrollo (industrial, recreacional), instalaciones críticas o áreas protegidas (SNASPE y áreas protegidas privadas)	1
Islas volcánicas	
Si >25% de una isla es cubierta por material volcánico holoceno	1

TABLA 3. PARAMETRIZACIÓN DE LOS VOLCANES DE CHILE PARA ESTIMACIÓN DE SUS ÁREAS DE PELIGRO.

No.	Volcán	Riesgo (sensu lato)	Coordenadas			Peligro de Caída		Peligros Proximales	
			Longitud (°W)	Latitud (°S)	Altura m s.n.m.	Tipo	Factor de Peligro	Razón H/L	Altura adicional
1	Tacora	39,8	-69,773	-17,721	5.980	S1	7	0,15	0
2	Taapaca	87,2	-69,512	-18,103	5.861	S2	12	0,15	0
3	Parinacota	67,4	-69,144	-18,165	6.350	S1	13	0,1	0
4	Guallatiri	71,8	-69,090	-18,419	6.060	S2	14	0,1	0
5	Arintica	23,9	-69,051	-18,746	5.597	S1	5	0,15	0
6	Isluga	36,3	-68,831	-19,145	5.530	S1	11	0,15	200
7	Irruputuncu	44,0	-68,559	-20,733	5.165	S1	11	0,15	0
8	Olca-Paruma	48,4	-68,479	-20,947	5.728	S1	7	0,1	0
9	Aucanquilcha	21,0	-68,468	-21,221	6.176	S1	5	0,15	0
10	Ollagüe	34,6	-68,179	-21,302	5.863	S2	9	0,15	0
11	Apacheta (Cerro del Azufre)	31,9	-68,240	-21,783	5.846	S1	6	0,15	0
12	San Pedro	58,0	-68,396	-21,887	6.145	S1	13	0,15	0
13	Putana	18,0	-67,852	-22,551	5.890	S1	6	0,15	0
14	Sairecabur	25,0	-67,892	-22,720	5.970	S1	5	0,15	0
15	Licancabur	25,0	-67,880	-22,830	5.916	S1	5	0,15	0
16	Alítar	25,0	-67,638	-23,144	5.346	S1	5	0,1	0
17	Colachi	15,0	-67,646	-23,240	5.631	S1	3	0,15	0
18	Acamarachi	15,0	-67,618	-23,290	6.046	S1	3	0,15	0
19	Láscar	80,0	-67,728	-23,365	5.592	S3	16	0,15	200
20	Chiliques	20,0	-67,702	-23,581	5.778	S1	5	0,15	0
21	Puntas Negras	9,0	-67,716	-23,673	5.852	S1	3	0,1/0,17	0
22	Miscanti	15,0	-67,540	-23,746	5.613	S1	3	0,15	0
23	Miñiques	20,0	-67,758	-23,816	5.910	S1	4	0,15	0
24	Caichinque	16,0	-67,739	-23,949	4.450	S1	4	0,15	0
25	Púlar	16,0	-68,056	-24,192	6.233	S1	4	0,15	0
26	Socompa	24,0	-68,245	-24,395	6.051	S1	6	0,15	0
27	Llullaillaco	27,0	-68,534	-24,720	6.723	S1	9	0,15	0
28	Escorial	9,0	-68,367	-25,082	5.447	S1	3	0,15	0
29	Lastarria	36,0	-68,510	-25,170	5.700	S1	12	0,1	0
30	Cordón del Azufre	9,0	-68,531	-25,340	5.480	S1	3	0,15	0
31	Nevados de Incahuasi	3,0	-68,292	-27,035	6.621	S1	3	0,15	0
32	Ojos del Salado	6,0	-68,708	-27,107	6.887	S1	3	0,15	0
33	El Solo	16,0	-68,547	-27,115	6.190	S1	8	0,15	0
34	Tupungatito	30,0	-69,816	-33,391	5.640	S1	10	0,15	150
35	Marmolejo	35,9	-69,879	-33,734	6.109	S1	6	0,17	0
36	San José	62,3	-69,895	-33,790	5.880	S1	10	0,15	0
37	Maipo	24,0	-69,832	-34,164	5.290	S1	8	0,15	0
38	Palomo	18,0	-70,297	-34,611	4.850	S1	6	0,17	0
39	Tinguiririca	74,1	-70,340	-34,817	4.280	S1	9	0,1	0
40	Planchón-Peteroa	99,4	-70,574	-35,241	4.090	S2	14	0,1	250
41	Descabezado Chico	32,2	-70,620	-35,515	3.250	S1	5	0,1/0,15	100

continuación tabla 3.

No.	Volcán	Riesgo (sensu lato)	Coordenadas			Peligro de Caída		Peligros Proximales	
			Longitud (°W)	Latitud (°S)	Altura m s.n.m.	Tipo	Factor de Peligro	Razón H/L	Altura adicional
42	Descabezado Grande	50,8	-70,751	-35,586	3.953	S2	10	0,15	250
43	Cerro Azul-Quizapu	83,1	-70,759	-35,654	3.788	S3	13	0,15	0
44	San Pedro-Pellado	63,3	-70,855	-35,992	3.621	S1	9	0,15	0
45	Laguna del Maule	20,4	-70,507	-36,058	2.180	S1	6	0,05/0,1/0,15	0
46	Nevado de Longaví	66,6	-71,164	-36,199	3.242	S2	9	0,17	0
47	Loma Blanca	14,9	-71,011	-36,289	2.230	S1	3	0,1	0
48	Nevados de Chillán	99,5	-71,368	-36,871	3.212	S2	12	0,1	0
49	Antuco	108,8	-71,351	-37,410	2.985	M2	9	0,15	0
50	Copahue	60,0	-71,170	-37,850	2.979	M2	15	0,1	0
51	Callaqui	42,6	-71,446	-37,926	3.100	M3	6	0,1	0
52	Tolhuaca	64,6	-71,646	-38,314	2.806	M2	7	0,1	0
53	Lonquimay	112,3	-71,589	-38,379	2.865	M3	10	0,15	0
54	Llaima	136,9	-71,733	-38,694	3.125	M3	14	0,1	0
55	Sollipulli	59,6	-71,519	-38,977	2.240	S2	8	0,1	500
56	Caburgua	18,5	-71,830	-39,200	480	M1	2	0,15	0
57	Relicura	18,5	-71,669	-39,263	1.610	M1	2	0,15/0,17	0
58	Huelemolle	18,4	-71,805	-39,297	538	M1	2	0,1	0
59	Villarrica	160,0	-71,939	-39,420	2.840	M3	15	0,1	0
60	Quetrupillán	95,4	-71,717	-39,498	2.360	S2	11	0,1	150
61	Lizán	13,4	-71,756	-39,632	1.019	M1	2	0,1	0
62	Lanín	27,0	-71,501	-39,639	3.747	M2	9	0,15	0
63	Fui	13,3	-71,928	-39,901	780	M1	2	0,1	0
64	Mocho-Choshuenco	86,5	-72,030	-39,930	2.430	M3	13	0,1	0
65	Carrán-Los Venados	65,4	-72,073	-40,366	700	M2	8	0,1	0
66	Puyehue-Cordón Caulle	107,2	-72,112	-40,585	2.240	S2	14	0,1	250
67	Antillanca	55,2	-72,155	-40,776	1.990	M2	7	0,15	0
68	Puntiagudo-Cordón Cenizos	46,9	-72,269	-40,973	2.493	M1	7	0,15	0
69	Osorno	88,7	-72,499	-41,102	2.652	M3	12	0,17	0
70	Cayutúe	16,2	-72,280	-41,253	830	M1	2	0,15	0
71	Calbuco	126,0	-72,614	-41,329	2.015	S2	14	0,1	150
72	Ralún	16,3	-72,310	-41,420	280	M1	2	0,15/0,2	0/100
73	Yate	84,2	-72,400	-41,759	2.111	S1	10	0,15	0
74	Hornopirén	60,4	-72,431	-41,876	1.572	M1	8	0,15	0
75	Apagado (Hualaihué)	45,9	-72,589	-41,884	1.670	M1	6	0,15	0
76	Huequi	47,9	-72,579	-42,379	1.050	S2	7	0,15	0
77	Michinmahuida	120,7	-72,445	-42,798	2.470	M3	14	0,15	0
78	Chaitén	134,9	-72,650	-42,837	950	S2	14	0,1	150
79	Palvidad	17,2	-72,739	43,103	700	M1	2	0,1	0
80	Corcovado	63,2	-72,794	-43,194	2.300	M2	10	0,1	0
81	Yanteles	45,0	-72,814	-43,500	2.042	M3	9	0,15	0
82	Alto Palena	15,0	-72,350	-43,650	375	M1	3	0,15	0

continuación tabla 3.

No.	Volcán	Riesgo (sensu lato)	Longitud (°W)	Latitud (°S)	Altura m s.n.m	Tipo	Factor de Peligro	Razón H/L	Altura adicional
83	Melimoyu	44,4	-72,868	-44,072	2.400	S2	9	0,15	0
84	Puyuhuapi	26,9	-72,573	-44,311	255	M1	4	0,05/0,1	0
85	Mentolat	32,5	-73,079	-44,695	1.660	M2	6	0,1	0
86	Cay	25,6	-72,988	-45,058	2.200	M2	4	0,15	0
87	Macá	63,8	-73,164	-45,104	2.960	M2	9	0,15	0
88	Hudson	68,0	-72,970	-45,900	1.905	S3	17	0,05	500
89	Lautaro	24,0	-73,506	-49,020	3.380	S1	8	0,15	0
90	Viedma	24,0	-73,315	-49,386	1.500	S2	8	0,1	250
91	Aguilera	24,0	-73,788	-50,402	2.546	S3	8	0,2	0
92	Reclus	28,0	-73,582	-50,936	1.000	S3	7	0,2	0
93	Pali-Aike	16,0	-70,100	-52,000	282	M1	4	-	-
94	Monte Burney	24,0	-73,379	-52,326	1.758	S3	8	0,1	0
95	Fueguino (Cook)	9,0	-70,248	-54,958	150	S1	3	0,05/0,1	0

Nota. Los casos en que se muestra más de un valor de H/L corresponden a aquellos grupos o complejos volcánicos en que se usó más de un valor para representar los peligros proximales.

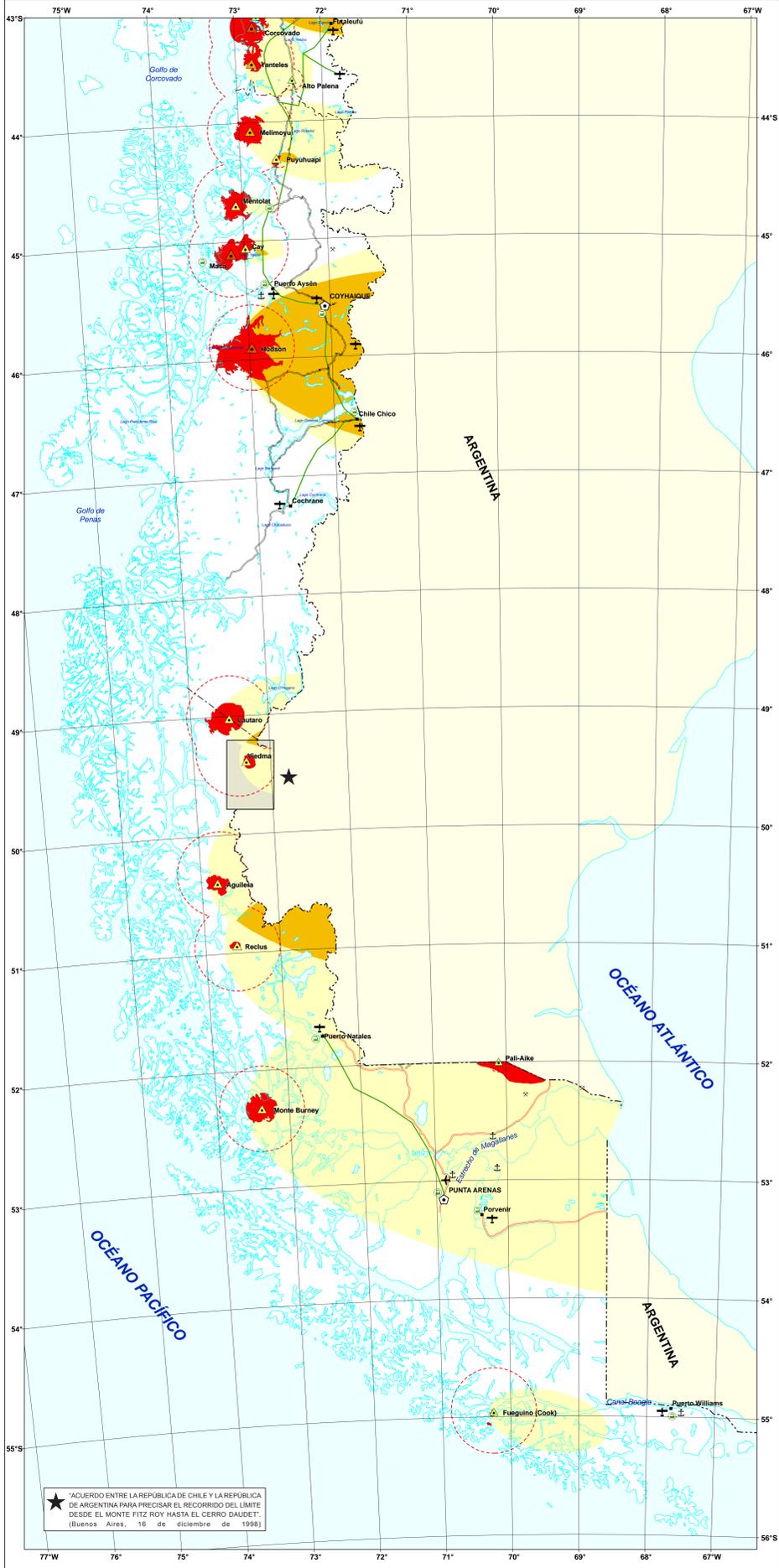
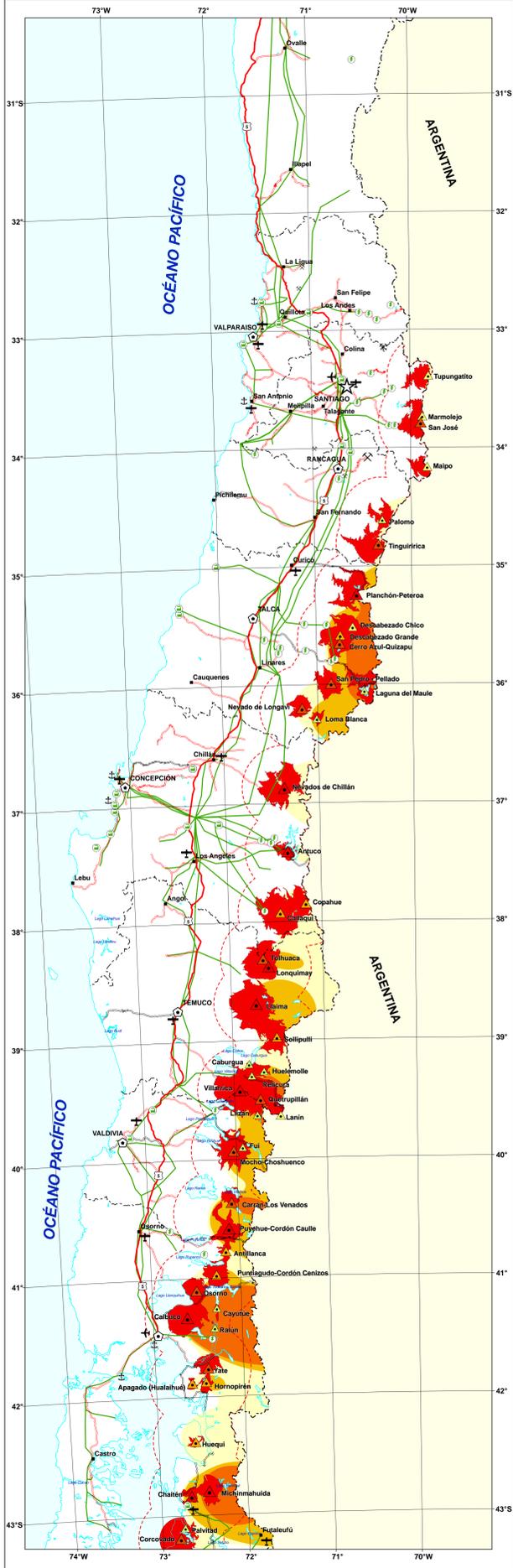
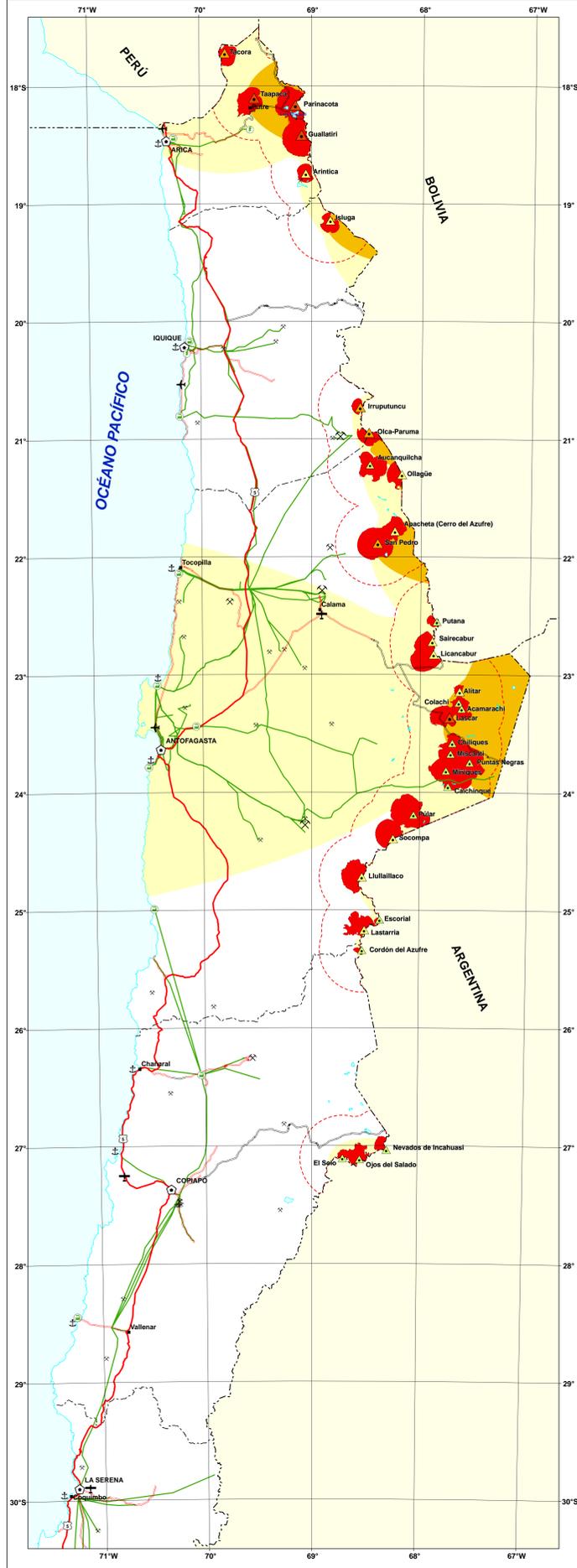
TABLA 4. CATEGORÍAS DE ERUPCIONES ESPERADAS.

Tipo de erupción	Ejemplo	IEV	Dimensiones Elipse *		Ht (m)	Hb (m)	Referencia
			Eje Mayor	Eje Menor			
M1	Vn. Lonquimay, Chile, diciembre de 1988	~2	24	12	4.000	2.800	Moreno y Gardeweg, 1989
M2	Vn. Hudson, Chile, 9 agosto 1991	~3	44	14	8.000	5.600	Naranjo <i>et al.</i> , 1993
M3	Vn. Fuego, Nicaragua, octubre de 1974	3-4	74	48	12.000	8.400	Rose <i>et al.</i> , 2007
S1	Vn. Láscar, Chile, abril de 1993	3	130	50	12.000	8.400	Déruelle <i>et al.</i> , 1996
S2	Vn. Chaitén, Chile, mayo de 2008	3-4	160	64	15.000	10.500	Alfano <i>et al.</i> , 2010
S3	Vn. Hudson, Chile, 15 agosto 1991	4-5	840	210	25.000	17.500	Naranjo <i>et al.</i> , 1993

* : Corresponde a las dimensiones de la isópaca de 1 cm, obtenidas de la referencia indicada.

Ht : Altura máxima de la columna eruptiva.

Hb: Altura de equilibrio en la atmósfera (sustentación). $Hb = 0,7Ht$.



LEYENDA

LAVAS, LAHARES, FLUJOS PIROCLÁSTICOS Y AVALANCHAS VOLCÁNICAS

Alto peligro de lavas, lahares y flujos piroclásticos y avalanchas. Representa el sector más susceptible de ser afectado por lavas, lahares y flujos piroclásticos, además de proyecciones ballísticas, como consecuencia de erupciones en un amplio rango de magnitudes a partir del sector principal y centros adyacentes. Corresponde al área afectada por los procesos más recurrentes que incluyen al edificio principal y centros adyacentes o cercanos. Los instrumentos de planificación deben considerar esta condición y promover medidas de mitigación tales como la vigilancia instrumental de los volcanes fuente, disponibilidad de mapas de peligro volcánico a escalas adecuadas y con distinción de los procesos, restricción a las obras de infraestructura pública mayor y planes de contingencia.

Bajo peligro de lavas y flujos piroclásticos. Representa el sector menos susceptible de ser afectado por lavas y flujos piroclásticos, como consecuencia de erupciones de alta magnitud a partir del edificio principal y centros adyacentes o cercanos. Corresponde al área afectada por procesos poco recurrentes, generalmente en el registro histórico, capaces de generar flujos de alta movilidad que podrían desplazarse grandes distancias por los valles o ascender los altos topográficos. Los instrumentos de planificación deben considerar esta condición y promover medidas de mitigación tales como la vigilancia instrumental de los volcanes fuente, disponibilidad de mapas de peligro volcánico a escalas adecuadas y con distinción de los procesos, sistemas de planes de contingencia.

CAÍDA DE PIROCLASTOS

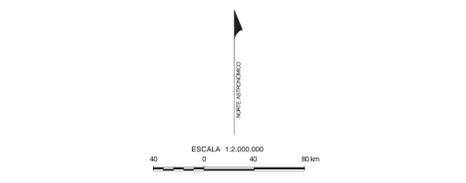
Alto peligro de caída de piroclastos. Representa el sector más susceptible de ser afectado por la acumulación de más de 1 cm de material piroclástico, generado en erupciones tipo asignadas a cada volcán según su historia eruptiva, en condiciones atmosféricas que reflejan estadísticamente las variaciones estacionales. Los instrumentos de planificación deben considerar esta condición y promover medidas de mitigación, tales como la vigilancia instrumental de los volcanes fuente, la disponibilidad de sistemas de alerta para la aeronavegación, normas de construcción adecuadas y planes de contingencia.

Moderado peligro de caída de piroclastos. Representa el sector moderadamente susceptible de ser afectado por la acumulación de más de 1 cm de material piroclástico, generado en erupciones tipo asignadas a cada volcán según su historia eruptiva, en condiciones atmosféricas que reflejan estadísticamente las variaciones estacionales. Los instrumentos de planificación deben considerar esta condición y promover medidas de mitigación tales como normas de construcción adecuadas y planes de contingencia.

Bajo peligro de caída de piroclastos. Representa el sector menos susceptible de ser afectado por la acumulación de más de 1 cm de material piroclástico, generado en erupciones tipo asignadas a cada volcán según su historia eruptiva, en condiciones atmosféricas que reflejan estadísticamente las variaciones estacionales. Los instrumentos de planificación deberían considerar esta condición y promover medidas de mitigación tales como planes de contingencia.

SIMBOLOGÍA

▲ Volcán geológicamente activo de muy alto nivel de riesgo específico	— Camino pavimentado
▲ Volcán geológicamente activo de alto nivel de riesgo específico	— Ruta 5
▲ Volcán geológicamente activo de moderado nivel de riesgo específico	— Camino sin pavimento
▲ Volcán geológicamente activo de bajo nivel de riesgo específico	✈ Puerto marítimo
▲ Volcán geológicamente activo de muy bajo nivel de riesgo específico	✈ Aeropuerto internacional
⊕ Central hidroeléctrica	✈ Aeródromo
⊕ Central termoeléctrica	★ Capital nacional
— Línea de transmisión eléctrica	⊙ Capital regional
✕ Faena minera (500 a 3.000 trabajadores)	— Frontera internacional
✕ Faena minera (3.000 a 8.000 trabajadores)	— Límite regional
✕ Faena minera (8.000 a 16.000 trabajadores)	— Lago, laguna, línea de costa



Referencia bibliográfica
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, No. 13, 34 p., 1 mapa escala 1:2.000.000, Santiago.
ISBN 978-95-708-038-0

© Servicio Nacional de Geología y Minería. Av. Santa María 0104, Casilla 10465, Santiago, Chile.
Director Nacional: Enrique Valdivia V.
Subdirector Nacional de Geología (S): Valdo Vivaldo B.
Derechos reservados, prohibida su reproducción.

Edición
Comité Editor: Mauricio Calderón N., Anibal Galindo C., Renzo Wal Z. (coordinadores).
Editores: Anibal Galindo C., Sergio Sepúlveda V.
Jefe de Publicaciones: Manuel Suárez D.
Corrección ortográfica: Soraya Avila N.
Jefe de Unidad de Sistemas de Información Geológica (USIG): Paulina Ojeda F.

Bases topográficas
Hojas UTM escala 1:250.000 del Instituto Geográfico Militar, modificadas.

Referencia geodésica
Coordenadas Geográficas, Datum WGS84.

Ayuda científica y técnica
Producción digital: Gabriel Orozco L., Programa de Riesgo Volcánico del Servicio Nacional de Geología y Minería.

"Autorizada su circulación, en cuanto a los mapas y citas que contiene esta obra, referencias o relaciones con las líneas internacionales y fronteras del territorio nacional, por Resolución No. 488 del 03/11/11 de la Dirección Nacional de Fronteras y Límites del Estado. La edición y circulación de mapas, cartas geográficas u otros impresos o documentos que se refieran o relacionen con los límites y fronteras de Chile, no constituyen, en modo alguno, el Estado de Chile de acuerdo con el Art. No. 2, letra g) del DFL No. 83 de 1979 del Ministerio de Relaciones Exteriores"

ISSN 0717-7305

SUBDIRECCIÓN NACIONAL DE GEOLOGÍA

PELIGROS VOLCÁNICOS DE CHILE

Luis E. Lara P.
Gabriel Orozco L.
Alvaro Amigo R.
Carolina Silva P.

CARTA GEOLÓGICA DE CHILE
SERIE GEOLÓGIA AMBIENTAL

No. 13 2011 Escala 1:2.000.000

★ ACUERDO ENTRE LA REPÚBLICA DE CHILE Y LA REPÚBLICA DE ARGENTINA PARA PRECISAR EL RECORRIDO DEL LÍMITE DESDE EL MONTE FITZ ROY HASTA EL CERRO DAUDET. (Buenos Aires, 16 de diciembre de 1998)