



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ciencias Químicas
Departamento Ciencias de la Tierra



Evaluación, comparación y categorización de la amenaza de los sistemas volcánicos chilenos Taapacá, San Pedro, Tupungatito, Planchón-Peteroa, Cerro Azul-Quizapu, Quetrupillán, Osorno, Calbuco, Chaitén y Hudson; y de los poblados expuestos a sus peligros volcánicos

Memoria para optar al Título de Geóloga

Paula Soledad Peñaloza Navarro

Profesor Patrocinante: Dr. José Luis Palma Lizama

Profesores Comisión: Dra. Fernanda Álvarez Amado
Dr. Jorge Quezada Flory

Concepción, 2023

ÍNDICE

	Página
RESUMEN	
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. FORMULACIÓN DE PROYECTO	1
1.2. OBJETIVOS	2
1.2. 1. Objetivo General	2
1.2. 2. Objetivos Específicos	2
1.3. UBICACIÓN Y ACCESO	3
1.4. METODOLOGÍA DE TRABAJO	7
1.5. AGRADECIMIENTOS	8
2. MARCO TEÓRICO	9
2.1. VOLCANISMO	9
2.2. PELIGRO VOLCÁNICO	15
2.3. EXPOSICIÓN VOLCÁNICA	18
2.4. AMENAZA VOLCÁNICA	19
2.5. VULNERABILIDAD	19
2.6. RIESGO VOLCÁNICO	20
3. MARCO VOLCANOLÓGICO	22
3.1. COMPLEJO VOLCÁNICO TAAPACÁ	22
3.1. 1. Rocas del basamento e intrusivas	22
3.1. 2. Rocas y depósitos volcánicos	22
3.1. 3. Historia eruptiva y peligros volcánicos	23
3.2. VOLCÁN SAN PEDRO	24
3.2. 1. Rocas del basamento e intrusivas	24
3.2. 2. Rocas y depósitos volcánicos	24
3.2. 3. Historia eruptiva y peligros volcánicos	25

3.3. VOLCÁN TUPUNGATITO.....	26
3.3. 1. Rocas del basamento e intrusivas	26
3.3. 2. Rocas y depósitos volcánicos	26
3.3. 3. Historia eruptiva y peligros volcánicos.....	27
3.4. COMPLEJO VOLCÁNICO PLANCHÓN-PETEROA.....	28
3.4. 1. Rocas del basamento e intrusivas	28
3.4. 2. Rocas y depósitos volcánicos	29
3.4. 3. Historia eruptiva y peligros volcánicos.....	29
3.5. COMPLEJO VOLCÁNICO CERRO AZUL- QUIZAPU.....	30
3.5. 1. Rocas del basamento e intrusivas	30
3.5. 2. Rocas y depósitos volcánicos.....	31
3.5. 3. Historia eruptiva y peligros volcánicos.....	31
3.6. COMPLEJO VOLCÁNICO QUETRUPILLÁN.....	32
3.6. 1. Rocas del basamento e intrusivas	32
3.6. 2. Rocas y depósitos volcánicos	33
3.6. 3. Historia eruptiva y peligros volcánicos.....	33
3.7. VOLCÁN OSORNO.....	34
3.7. 1. Rocas del basamento e intrusivas	35
3.7. 2. Rocas y depósitos volcánicos	35
3.7. 3. Historia eruptiva y peligros volcánicos.....	35
3.8. VOLCÁN CALBUCO.....	37
3.8. 1. Rocas del basamento e intrusivas	37
3.8. 2. Rocas y depósitos volcánicos.....	37
3.8. 3. Historia eruptiva y peligros volcánicos.....	38
3.9. VOLCÁN CHAITÉN.....	39
3.9. 1. Rocas del basamento e intrusivas	39
3.9. 2. Rocas y depósitos volcánicos.....	40

3.9. 3. Historia eruptiva y peligros volcánicos.....	40
3.10. VOLCÁN HUDSON.....	41
3.10. 1. Rocas del basamento e intrusivas	42
3.10. 2. Rocas y depósitos volcánicos	42
3.10. 3. Historia eruptiva y peligros volcánicos.....	42
4. METODOLOGÍA.....	44
4.1. ANÁLISIS DE EXPOSICIÓN.....	44
4.1. 1. Procesamiento de datos.....	45
4.1.1.1. Análisis de zonas edificadas en área rural	46
4.1.1.2. Análisis de zonas edificadas en poblados.....	47
4.1. 2. Cuantificación de elementos expuestos.....	50
4.1.2.1. Cuantificación de personas y viviendas	51
4.1.2.2. Cuantificación de infraestructuras críticas.....	51
4.1.2.3. Infraestructuras de carácter social.....	52
4.1.2.4. Infraestructuras de respuesta.....	52
4.1.2.5. Infraestructuras de energía y suministro.....	52
4.1.2.6. Infraestructuras de transporte.....	53
4.1. 3. Exposición de personas.....	54
4.1. 4. Exposición de infraestructuras.....	55
4.1. 5. Exposición total	57
4.2. ANÁLISIS DE AMENAZA.....	57
4.2. 1. Cuantificación de las zonas de peligro.....	57
4.2. 2. Factores de evaluación.....	59
4.2.2.1. Factor de recurrencia.....	59
4.2.2.2. Factor de peligro.....	59

4.2. 3. Cuantificación de la amenaza absoluta.....	60
4.2.3.1. Amenaza absoluta de personas.....	60
4.2.3.2. Amenaza absoluta de infraestructuras.....	61
4.2.3.3. Amenaza absoluta total.....	62
4.2. 4. Cuantificación de la amenaza normalizada.....	62
4.2.4.1. Amenaza normalizada de personas.....	63
4.2.4.2. Amenaza normalizada de infraestructuras.....	63
4.2.4.3. Amenaza normalizada total.....	64
5. RESULTADOS.....	66
5.1. COMPLEJO VOLCÁNICO TAAPACÁ.....	66
5.1. 1. Putre.....	68
5.2. VOLCÁN SAN PEDRO.....	70
5.3. VOLCÁN TUPUNGATITO.....	72
5.4. COMPLEJO VOLCÁNICO PLANCHÓN-PETEROA.....	75
5.4. 1. Los Queñes.....	76
5.5. COMPLEJO VOLCÁNICO CERRO AZUL- QUIZAPU.....	78
5.6. COMPLEJO VOLCÁNICO QUETRUPILLÁN.....	78
5.6. 1. Curarrehue.....	80
5.7. VOLCÁN OSORNO	82
5.7. 1. Las Cascadas.....	84
5.7. 2. Ensenada.....	86
5.8. VOLCÁN CALBUCO.....	89
5.8. 1. Ensenada.....	91
5.8. 2. Ralún.....	93
5.8. 3. Correntoso.....	95
5.8. 4. Colonia Río Sur.....	97
5.8. 5. Río Blanco- Colorado.....	99
5.9. VOLCÁN CHITÉN.....	102

5.9. 1. Chaitén.....	103
5.10. VOLCÁN HUDSON.....	106
5.11. RANKING FINAL.....	107
6. DISCUSIONES.....	110
6.1. FACTOR DE PELIGRO O FACTOR DE RECURRENCIA.....	110
6.2. AMEMAZA ABSOLUTA Y AMENAZA NORMALIZADA.....	114
6.3. CONTRASTE ENTRE LA EXPOSICIÓN Y AMENAZA DE PERSONAS E INFRAESTRUCTURAS EN LOS SISTEMAS VOLCÁNICOS DE ESTUDIO.....	118
6.4. CONTRASTE ENTRE LA EXPOSICIÓN Y AMENAZA DE PERSONAS E INFRAESTRUCTURAS EN LOS POBLADOS DE ESTUDIO.....	121
6.5. RELACIÓN ENTRE LA EXPOSICIÓN DE PERSONAS E INFRAESTRUCTURAS.....	125
6.6. DISTRIBUCIÓN DE LAS INFRAESTRUCTURAS CRÍTICAS.....	126
6.7. IMPLICANCIA Y RELEVANCIA DEL FACTOR DE PELIGRO Y LA EXPOSICIÓN TOTAL EN LA AMENAZA VOLCÁNICA.....	128
6.8. LIMITACIONES EN LA EVALUACIÓN DE AMENAZA VOLCÁNICA	129
7. CONCLUSIONES.....	132
8. REFERENCIAS.....	136
ANEXOS.....	149

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. 1. Mapa de ubicación y acceso de las regiones: Arica y Parinacota, Antofagasta y Metropolitana.....	4
1. 2. Mapa de ubicación y acceso de las regiones: Maule, Araucanía y Los Ríos.....	5
1. 3. Mapa de ubicación y acceso de las regiones: Los Lagos y Aysén del General Ibáñez del Campo.....	6
2. 1. Zonas de formación de volcanes.....	9
2. 2. Mapa global de la localización y el estado de los volcanes del Holoceno.	10
2. 3. Esquema sobre procesos volcánicos.....	11
2. 4. VEI máximo registrado de los volcanes potencialmente peligrosos	16
2. 5. Histograma de las erupciones explosivas en el mundo clasificadas por su VEI ocurridas durante el Holoceno.....	17
2. 6. Esquema que representa la relación entre los conceptos usados en este estudio.....	21
3. 1. Mapa de peligro del complejo volcánico Taapacá.....	23
3. 2. Mapa de peligro del volcán San Pedro.....	25
3. 3. Mapa de peligro del volcán Tupungatito.....	27
3. 4. Mapa de peligro del complejo volcánico Planchón-Peteroa.....	30
3. 5. Mapa de peligro del complejo volcánico Cerro Azul-Quizapu.....	32
3. 6. Mapa de peligro del complejo volcánico Quetrupillán.....	34
3. 7. Mapa de peligro del volcán Osorno.....	36
3. 8. Mapa de peligro del volcán Calbuco.....	39
3. 9. Mapa de peligro del volcán Chaitén.....	41
3. 10. Mapa de peligro del volcán Hudson.....	43
4. 1. División del territorio realizada para el censo del 2017.....	45
4. 2. Ejemplo de criterio de selección de puntos. Los círculos naranjas corresponden a los buffers guía seleccionados, por contener en su interior construcciones que cumplen con los requisitos de selección.....	47
4. 3. Área rural construida (ARC) a partir del criterio de selección de puntos.	47

4.	4.	Representación de una entidad censal construida (ECC) perteneciente a una entidad censal modificada (ECM), que, interceptada con la zona de peligro, da origen a una entidad censal modificada de peligro (ECMP).	48
4.	5.	Representación del área planimétrica del poblado de Chaitén en relación al área total de su <i>buffer</i>	50
5.	1.	Mapa de amenaza del complejo volcánico Taapacá.....	68
5.	2.	Mapa de amenaza del poblado de Putre.....	70
5.	3.	Mapa de amenaza del volcán San Pedro.....	72
5.	4.	Mapa amenaza del volcán Tupungatito.....	74
5.	5.	Mapa de amenaza del complejo volcánico Planchón-Peteroa.....	76
5.	6.	Mapa de amenaza del poblado Los Queñes.....	78
5.	7.	Mapa de amenaza del complejo volcánico Quetrupillán.....	80
5.	8.	Mapa de amenaza del poblado Curarrehue.....	82
5.	9.	Mapa de amenaza del volcán Osorno.....	84
5.	10.	Mapa de amenaza del poblado Las Cascadas.....	86
5.	11.	Mapa de amenaza del poblado Ensenada ante los peligros del volcán Osorno.....	88
5.	12.	Mapa de amenaza del volcán Calbuco.....	91
5.	13.	Mapa de amenaza del poblado Ensenada ante los peligros del volcán Calbuco.....	93
5.	14.	Mapa de amenaza del poblado Ralún.....	95
5.	15.	Mapa de amenaza del poblado Correntoso.....	97
5.	16.	Mapa de amenaza del poblado Colonia Río Sur.....	99
5.	17.	Mapa de amenaza del poblado Río Blanco-Colorado.....	101
5.	18.	Mapa de amenaza del volcán Chaitén.....	103
5.	19.	Mapa de amenaza del poblado de Chaitén.....	105
5.	20.	Mapa de amenaza del volcán Hudson.....	107
6.	1.	Amenaza absoluta (a) y amenaza normalizada (b) de los distintos sistemas volcánicos usando el factor de peligro versus el factor de recurrencia.....	111
6.	2.	Amenaza absoluta (a) y amenaza normalizada (b) de los poblados afectados por los peligros volcánicos de los centros eruptivos aledaños, usando el factor de peligro versus el factor de recurrencia.....	112
6.	3.	Relación entre el factor de peligro y factor de recurrencia de los distintos centros eruptivos.....	113

6.	4. Valor de amenaza absoluta (a) y amenaza normalizada (b) por nivel de peligro en los distintos sistemas volcánicos.....	115
6.	5. Valor de amenaza absoluta (a) y amenaza normalizada (b) por nivel de peligro en los distintos poblados.....	116
6.	6. Relación entre la amenaza absoluta y normalizada en los sistemas volcánicos de estudio (a) y en los poblados aledaños a estos (b).....	117
6.	7. Valores de exposición (a), amenaza absoluta (b) y amenaza normalizada (c) de la población afectada por los distintos niveles de peligro de los centros volcánicos de estudio, usando el factor de peligro.....	119
6.	8. Valores de exposición (a), amenaza absoluta (b) y amenaza normalizada (c) de las infraestructuras afectadas por los distintos niveles de peligro de los centros volcánicos.....	120
6.	9. Valores de exposición (a), amenaza absoluta (b) y amenaza normalizada (c) de la población ubicada en los poblados y afectada por los distintos niveles de centros volcánico, usando el factor de peligro.....	122
6.	10. Valores de exposición (a), amenaza absoluta (b) y amenaza normalizada (c) de las infraestructuras ubicadas en los poblados y afectadas por los distintos niveles de peligro volcánico.....	124
6.	11. Personas e infraestructuras expuestas a los peligros de los sistemas volcánicos de estudio.....	125
6.	12. Relación entre la exposición de personas e infraestructuras en los sistemas volcánicos de estudio.....	126
6.	13. Detalle de los valores de exposición de infraestructuras críticas en sistemas volcánicos (a) y poblados (b).....	127
6.	14. Valores de exposición total comparados con los valores de amenaza absoluta total en los sistemas volcánicos de estudio.....	128
6.	15. Factores de peligro comparado con los valores de amenaza absoluta total en los sistemas volcánicos de estudio.....	129

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
4. 1. Factor de exposición atribuido a los distintos activos evaluados.....	51
4. 2. Términos utilizados en la evaluación.....	54
4. 3. Puntajes asignados a cada zona de peligro de los mapas de peligro volcánico del SERNAGEOMIN, en base a la clasificación de los mapas de peligro integrado.....	58
4. 4. Factor de recurrencia y factor de peligro de los volcanes de estudio.....	60
5. 1. Valores de exposición y amenaza de personas e infraestructuras del complejo volcánico Taapacá.....	66
5. 2. Valores de exposición y amenaza de personas e infraestructuras de Putre.....	69
5. 3. Valores de exposición y amenaza de personas e infraestructuras del volcán San Pedro.....	71
5. 4. Valores de exposición y amenaza de personas e infraestructuras del volcán Tupungatito.....	73
5. 5. Valores de exposición y amenaza de personas e infraestructuras del complejo volcánico Planchón-Peteroa.....	75
5. 6. Valores de exposición y amenaza de personas e infraestructuras de Los Queñes.....	77
5. 7. Valores de exposición y amenaza de personas e infraestructuras del complejo volcánico Quetrupillán.....	79
5. 8. Valores de exposición y amenaza de personas e infraestructuras de Curarrehue.....	81
5. 9. Valores de exposición y amenaza de personas e infraestructuras del volcán Osorno.....	83
5. 10. Valores de exposición y amenaza de personas e infraestructuras de Las Cascadas.....	85
5. 11. Valores de exposición y amenaza de personas e infraestructuras de Ensenada afectadas por los peligros del volcán Osorno.....	87
5. 12. Valores de exposición y amenaza de personas e infraestructuras del volcán Calbuco.....	89
5. 13. Valores de exposición y amenaza de personas e infraestructuras de Ensenada afectadas por los peligros del volcán Calbuco.....	92
5. 14. Valores de exposición y amenaza de personas e infraestructuras de Ralún.....	94

5.	15.	Valores de exposición y amenaza de personas e infraestructuras de Correntoso.....	96
5.	16.	Valores de exposición y amenaza de personas e infraestructuras de Colonia Río Sur.....	98
5.	17.	Valores de exposición y amenaza de personas e infraestructuras del Río Blanco-Río Colorado.....	100
5.	18.	Valores de exposición y amenaza de personas e infraestructuras del volcán Chaitén.....	102
5.	19.	Valores de exposición y amenaza de personas e infraestructuras de la ciudad de Chaitén.....	104
5.	20.	Valores de exposición y amenaza de personas e infraestructuras del volcán Hudson.....	106
5.	21.	Ranking de amenaza absoluta en sistemas volcánicos con factor de peligro.....	108
5.	22.	Ranking de amenaza absoluta en poblados con factor de peligro.....	108
5.	23.	Ranking de amenaza absoluta en sistemas volcánicos con factor de recurrencia.....	108
5.	24.	Ranking de amenaza absoluta en poblados con factor de recurrencia.....	108
5.	25.	Ranking de amenaza normalizada en sistemas volcánicos con factor de peligro.....	109
5.	26.	Ranking de amenaza normalizada en poblados con factor de peligro.....	109
5.	27.	Ranking de amenaza normalizada en sistemas volcánicos con factor de recurrencia.....	109
5.	28.	Ranking de amenaza normalizada en poblados con factor de recurrencia.....	109

RESUMEN

La creciente expansión demográfica en Chile ha provocado que cada vez sea más frecuente el asentamiento humano en zonas expuestas a peligros volcánicos. Esta problemática establece la necesidad de desarrollar metodologías de jerarquización de sistemas volcánicos y disponer de herramientas de evaluación de la amenaza volcánica de fácil comprensión, rápida elaboración y replicables, para asistir a la toma de decisiones y enfocar las estrategias para la reducción del riesgo de desastres a nivel mundial.

El presente trabajo propone una actualización a la evaluación de amenaza volcánica que SERNAGEOMIN realiza a través de su ranking de riesgo específico (2019), por medio de una nueva e innovadora metodología, donde se realiza una cuantificación de amenaza volcánica con énfasis en los poblados expuestos alrededor de volcanes en Chile. Esta metodología incorpora tanto los mapas de peligro volcánico, como la distribución espacial de elementos expuestos a peligros derivados de los centros eruptivos de estudio (personas e infraestructuras), mediante el procesamiento de las bases de datos del: Censo (2017), Instituto Nacional de Estadísticas (INE), Infraestructuras de Datos Geospaciales (IDE), Comisión Nacional de Energía (CNE) y la Biblioteca del Congreso Nacional (BCN); utilizando el *software* de Sistemas de Información Geográfica (SIG) libre y gratuito: QGIS 3.24.

La cuantificación de este conjunto de elementos y la incorporación de un factor de peligro, permite la categorización de volcanes y poblados dentro de rankings de amenaza absoluta y normalizada, además de la elaboración de mapas de amenaza volcánica tanto para las áreas de alcance de un determinado volcán, como para los poblados expuestos de manera individual.

Los resultados muestran que los poblados expuestos que representan una mayor amenaza absoluta son Chaitén, Las Cascadas, Putre y Curarrehue, siendo la localidad de Chaitén la que presenta mayor porcentaje de su superficie total amenazada por una zona de muy alto peligro. En tanto, los volcanes Chaitén, Quetrupillán, Calbuco y Osorno corresponden a los centros eruptivos que impone la mayor amenaza de este estudio. Mientras que el Complejo Cerro Azul-Quizapu, a pesar de presentar una de las erupciones holocenas más grandes de Sudamérica, no evidencia amenaza, debido a que sus peligros volcánicos no exponen a ninguna personas ni infraestructura. Estos resultados pueden asistir a la asignación prioritaria de recursos para la gestión de riesgo de desastres, con el fin de tomar decisiones enfocadas en el resguardo de la población.

1. INTRODUCCIÓN

Los volcanes tienen una importante presencia en la geografía del territorio nacional. En Chile continental e insular se localizan cerca de 2.000 volcanes, 92 de ellos activos y 45 monitoreados por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), donde extensas comunidades se han emplazado dentro del área de influencia de potenciales peligros volcánicos. Dado sus amplias implicaciones socio-económicas, la responsabilidad primaria para la gestión de las emergencias volcánicas yace en manos de las autoridades civiles. Donde es necesaria la identificación de volcanes de alto riesgo con el objetivo de determinar cuáles merecen la mayor y posiblemente la más inmediata atención por parte de científicos y autoridades gubernamentales (Tilling, 1993). Es por esto que en este trabajo se ha realizado un estudio sistemático de los volcanes de mayor riesgo, según SERNAGEOMIN (2019), para evaluar su amenaza, según un ranking actualizado de los centros eruptivos y localidades más peligrosas. Conocer la amenaza volcánica del territorio les permite a las autoridades contar con información oportuna para implementar medidas de reducción del riesgo volcánico con el fin de tomar decisiones enfocadas en la seguridad de la población.

1.1. Formulación del proyecto

El concepto de amenaza volcánica implica la combinación de los peligros producidos por un volcán y la exposición de las personas y propiedades que se encuentran en riesgo de estos fenómenos volcánicos (Ewert *et al.*, 2005). Este trabajo busca realizar una versión actualizada y detallada de la evaluación de la amenaza volcánica de 10 de los 26 centros eruptivos de mayor riesgo específico del país, según el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), y de los poblados afectados por los peligros derivados de estos. Esto en base a la constante problemática que inquieta a distintas comunidades que habitan en las proximidades de volcanes activos, y que están expuestas al efecto directo e indirecto de posibles erupciones volcánicas, presentando un grado de amenaza para las personas y las infraestructuras. Es por esto que se implementa una nueva metodología adaptada del National Volcano Early Warning System (NVEWS), con el fin de parametrizar, nivelar y categorizar los valores de amenaza, integrando tanto los volcanes de estudio, como los poblados aledaños. Esta metodología utiliza los mapas de peligro volcánico preparados por el SERNAGEOMIN para generar un análisis de elementos expuestos a estos peligros mediante el procesamiento de datos del Censo (2017), INE, IDE, CNE y BCN, utilizando herramientas SIG (*software* QGIS3.24.).

De esta manera, se realiza la evaluación de amenaza de la población, viviendas e infraestructuras críticas (establecimientos de educación, centros de salud, bomberos, carabineros, municipios, centrales hidroeléctricas, aeródromos, rutas y puentes), susceptibles a ser afectados por peligros volcánicos, con la finalidad de comparar y discutir el valor de amenaza que representan. Este trabajo representa un avance en cuanto al detalle considerado y a la información que se obtiene del ranking de riesgo específico que SERNAGEOMIN utiliza para tomar decisiones en sus programas de evaluación de peligros y monitoreo volcánico. Es por esto que se ha trabajado de la mano con un equipo de la Red Nacional de Vigilancia Volcánica (RNVV), que ha entregado retroalimentación para permitir generar un producto que puede ser de utilidad para el SERNAGEOMIN.

1.2. Objetivos

1.2. 1. Objetivo General: Cuantificar, comparar y categorizar la amenaza de los sistemas volcánicos de estudio: Taapacá, San Pedro, Tupungatito, Planchón-Peteroa, Cerro Azul-Quizapu, Quetrupillán, Osorno, Calbuco, Chaitén y Hudson; y de todos los poblados que puedan ser afectados directamente por los diversos peligros volcánicos derivados de ellos.

1.2. 2. Objetivos Específicos:

- 1.** Cuantificar el nivel de exposición de la población, viviendas e infraestructuras críticas para cada volcán de estudio y sus poblados aledaños.
- 2.** Cuantificar la amenaza volcánica de cada poblado y centro eruptivo.
- 3.** Crear un ranking de amenaza para poblados y otro para toda la población que puede ser afectada por los peligros de los volcanes de estudio.
- 4.** Determinar la distribución de la amenaza volcánica en los poblados y centros eruptivos a través de mapas.
- 5.** Generar una base de datos geoespacial con información referente a los peligros de los volcanes de estudio, datos censales y todos los productos obtenidos, que permita incorporar modificaciones y/o actualizaciones para ser utilizada por distintas entidades como base para la elaboración de planes de desarrollo, acción, vigilancia, organización y educación para reducir los efectos de las amenazas volcánicas.

1.3. Ubicación y acceso

Los sistemas volcánicos de estudio se distribuyen a lo largo de todo el país, en las regiones de: Arica y Parinacota, Antofagasta, Metropolitana, Maule, Araucanía, Los Ríos, Los Lagos y Aysén del General Ibáñez del Campo. Donde se concentran a lo largo de la cordillera de los Andes, en las distintas zonas volcánicas.

En la zona norte de Chile, a lo largo del altiplano y la puna, entre 17° y 27° S, se emplazan volcanes pertenecientes a la Zona Volcánica de los Andes Centrales (ZVC). En esta zona se reconocen el complejo volcánico Taapacá y el volcán San Pedro (Figura 1.1.). El primero se ubica en la región de Arica y Parinacota, a 11 km al NE del pueblo de Putre que se conecta por la ruta internacional 11-CH. Por su parte, el volcán San Pedro se localiza en la región de Antofagasta, a 85 km al NE de Calama por la ruta internacional 21-CH.

La Zona Volcánica de los Andes del Sur (ZVS) se encuentra entre 33°S y 46°S, y sus volcanes se caracterizan por ser los que registran históricamente mayor actividad volcánica (Stern, 2004). En esta zona se ubican los sistemas volcánicos Tupungatito (Figura 1.1.), Planchón-Peteroa, Cerro Azul-Quizapu, Quetrupillán (Figura 1.2.), Osorno, Calbuco, Chaitén y Hudson (Figura 1.3.).

El volcán Tupungatito se ubica en la región Metropolitana, a 55 km al este de la comuna San José de Maipo, siguiendo el camino regional, provincial, comunal y de acceso G-345. Por otro lado, tanto el complejo Planchón-Peteroa como el complejo Cerro Azul-Quizapu se localizan en la región del Maule. El complejo Planchón-Peteroa se encuentra a 65 km al SE de la ciudad de Curicó, que se conecta por el camino regional principal J-55. En tanto, el complejo Cerro Azul-Quizapu se ubica a 106 km al este de la ciudad de Talca siguiendo la ruta internacional 115-CH. El complejo Quetrupillán, por su parte se encuentra en el límite entre la región de la Araucanía y la región de Los Ríos, a 18 km al SSW del poblado de Curarrehue, conectados por la ruta internacional 199-CH.

Por su parte, los volcanes Osorno, Calbuco y Chaitén se localizan en la región de Los Lagos. Donde el volcán Osorno se encuentra a 47 km al NE de la ciudad de Puerto Varas y se conecta por medio de la ruta internacional 225-CH. En tanto, el volcán Calbuco se encuentra a 30 km al este de la ciudad de Puerto Varas, donde conecta con la misma ruta internacional 225-CH. El volcán Chaitén se ubica a 10 km al norte de su pueblo homónimo, desde la ruta nacional 7. Finalmente, el volcán Hudson se encuentra en la región de Aysén del General Ibáñez del Campo, a 80 km al oeste de Coyhaique y 60 km al SW de Puerto Aysén.

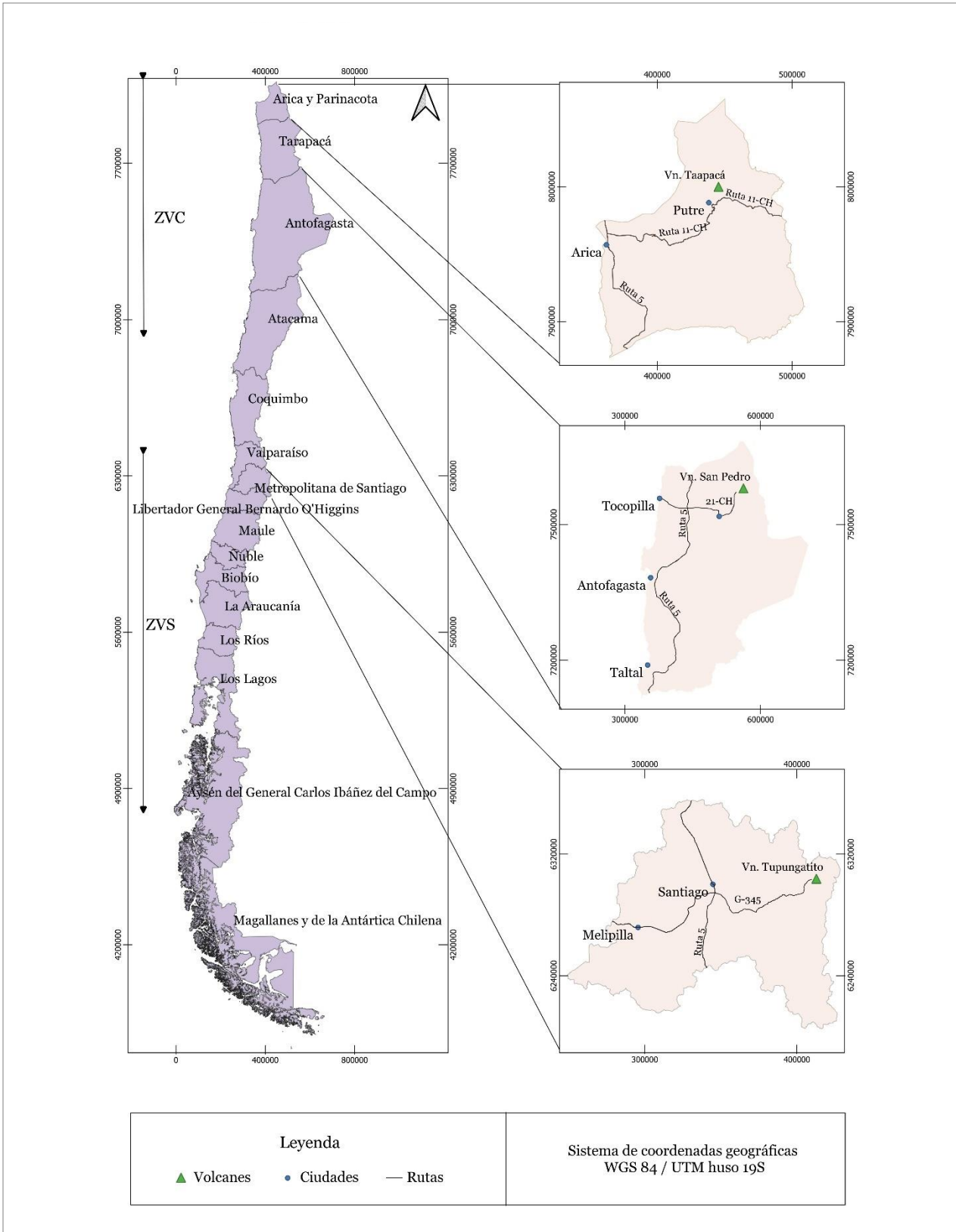


Figura 1.1. Mapa de ubicación y acceso de las regiones: Arica y Parinacota, Antofagasta y Metropolitana.

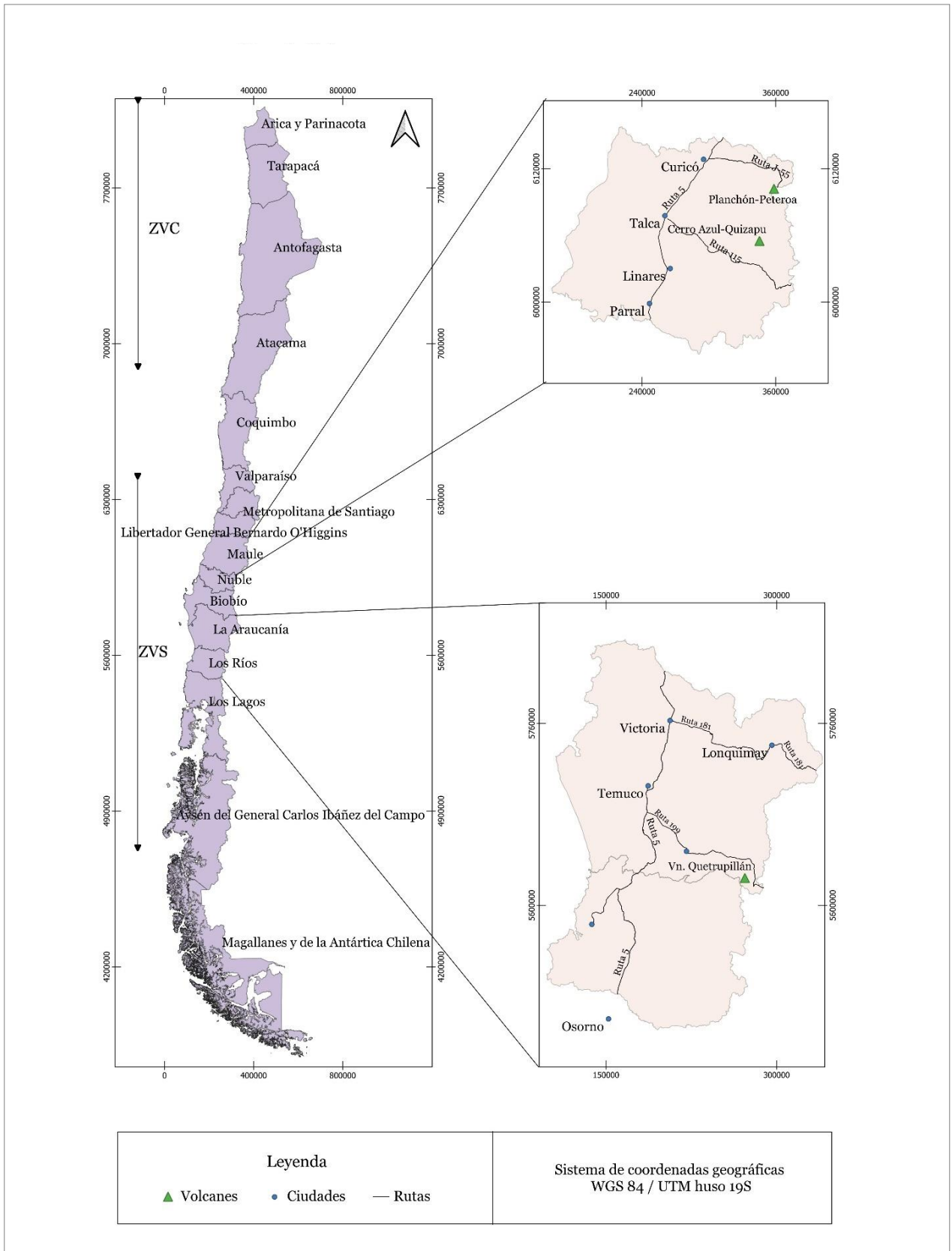


Figura 1.2. Mapa de ubicación y acceso de las regiones: Maule, Araucanía y Los Ríos.

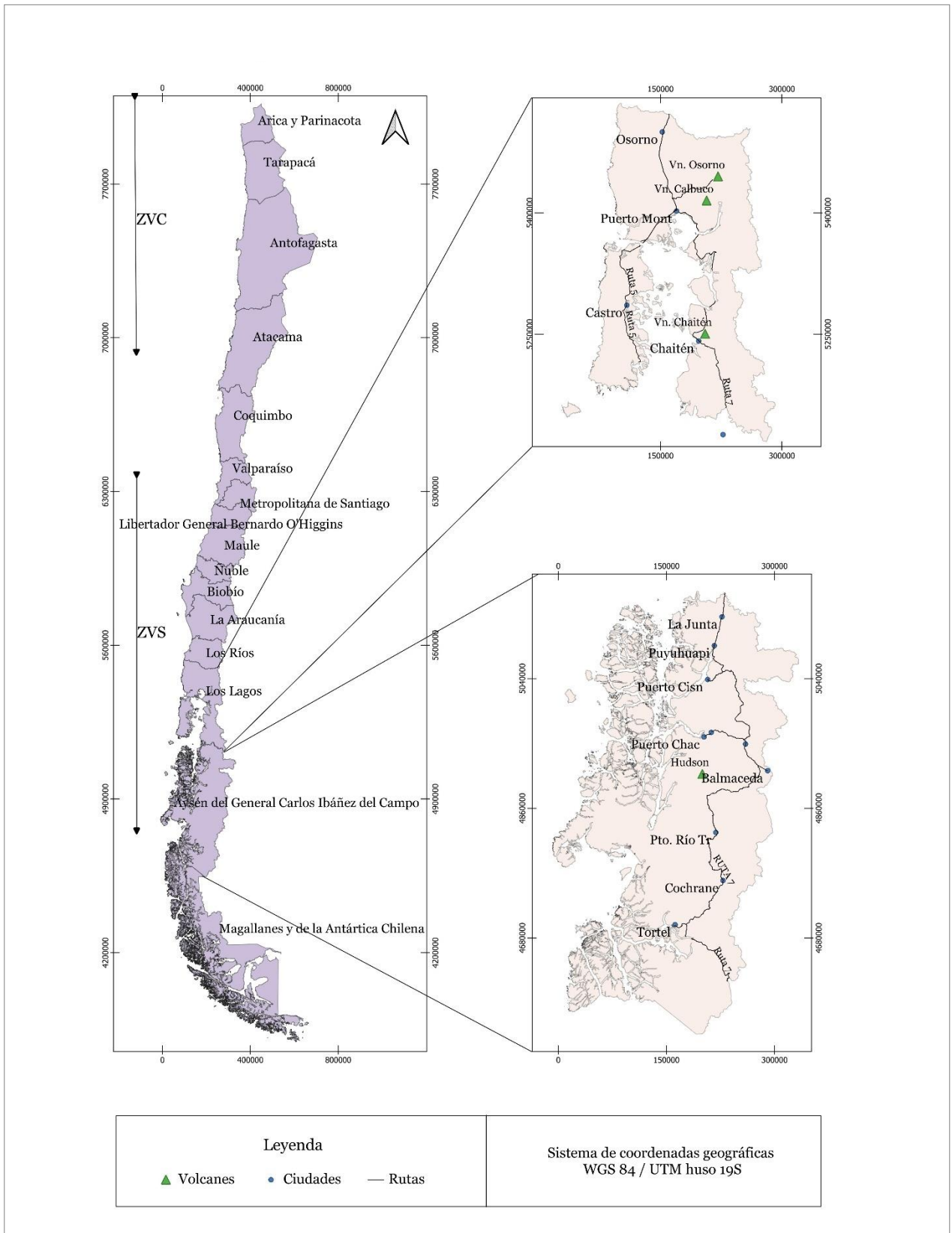


Figura 1.3. Mapa de ubicación y acceso de las regiones: Los Lagos y Aysén del General Ibáñez del Campo.

1.4. Metodología de trabajo

Para el desarrollo de este estudio se pueden determinar las siguientes etapas de trabajo:

Etapas 1: Compilación de antecedentes y obtención de datos de peligros

En esta primera instancia se debe recopilar y analizar la información existente sobre los centros volcánicos, esto incluye su registro eruptivo y productos asociados, compilado de Petit-Breuilh (2004) y de la base de datos del Global Volcanism Program de Smithsonian Institution. Los peligros de cada volcán se obtienen de las cartas geológicas de Chile, de la serie de geología ambiental, proporcionadas por el SERNAGEOMIN. Se procede a la digitalización y homogenización de estos mapas, en los que se evidencian áreas que son susceptibles a ser afectadas por distintos productos de eventos volcánicos (avalanchas volcánicas, lahares, flujos piroclásticos, caída de cenizas, etc), a los cuales se le asigna un valor numérico en base al nivel de peligro relativo indicada en la leyenda de cada mapa.

Etapas 2: Cuantificación de elementos expuestos

Se elaboró una base de datos espacial de elementos expuestos en áreas localizadas, con información referente a la distribución de la población urbana y rural, y la ubicación de las diferentes infraestructuras críticas (establecimientos educacionales, centros de salud, bomberos, carabineros, municipios, centrales hidroeléctricas, aeródromos, puentes y las principales vías de transporte). Estas fueron interceptadas con los mapas de peligro de cada volcán en el *software* QGIS 3.14, para finalmente asignarles un puntaje a los elementos potencialmente expuestos al peligro volcánico. La distribución de la población y viviendas fue realizada mediante un análisis fotogramétrico a una escala de 1:5000 a 1:1000, a través de imágenes satelitales proporcionadas por *Google Satellite* y *Open Street Map* mediante el complemento *Quick Map Services* (QMS) del *software* QGIS 3.24.

Etapas 3: Evaluación de amenaza de los volcanes de estudio y sus poblados aledaños

La evaluación de amenaza total de volcanes y poblados expuestos a los peligros de estos, corresponde a la sumatoria de los puntajes de amenaza de cada zona de peligro del volcán de estudio. Finalmente se procede a realizar un análisis y comparación de los resultados obtenidos entre los distintos volcanes y localidades a través de un ranking de amenaza. El producto final consiste, además, en los respectivos mapas de amenaza volcánica.

1.5. Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi profesor patrocinante, el Dr. José Luis Palma por darme la oportunidad de trabajar en una de las áreas que tanto me motiva de la geología, y en la que se terminó enmarcando mi memoria de título. Su apoyo, enseñanzas, contribuciones y comentarios fue lo que me ayudó a desarrollar y finalizar felizmente este trabajo. Agradezco también a los profesores de mi comisión, la Dra. Fernanda Álvarez y el Dr. Jorge Quezada por su tiempo y buena disposición para corregir mi memoria.

Este trabajo está lejos de ser un mérito personal, ya que fue parte de un proyecto mayor que se realizó en conjunto de excelentes personas y profesionales. Aquí quiero agradecer el apoyo y compañía de Nicolás Hidalgo y Diego Castillo en todo el proceso, sin ellos todo hubiese sido más tedioso y dificultoso. También quiero agradecer a Franco Vera y Constanza Jorquera por la gran guía que nos dieron, por el tiempo, la ayuda y dedicación que nos brindaron ante cada duda y en cada reunión.

Quisiera agradecer también a la Sra. Carolina Rojas por estar siempre presente, por su ayuda y colaboración en todas las gestiones de mi proceso educativo. Además, a don Raúl, don Pedro, don Iván y don Mauricio por su recibimiento cada mañana en el departamento y por su apoyo en los terrenos.

Quiero aprovechar de agradecer profundamente a mi amigas y amigos, a los de siempre, a los de la U, a los del colegio, a los que llegaron, también a los que se fueron. Cada uno fue parte de este proceso directa o indirectamente, y les estaré eternamente agradecida por marcar su presencia en mí.

A mi familia, no tengo palabras para expresar mi gratitud. Son mi apoyo incondicional y mi soporte, gracias por catetearme y por contenerme, espero algún día poder devolverles todo lo que me han dado. Y finalmente, gracias a mi compañero, a tu lado todo es mejor.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. VOLCANISMO

Como se observa en la Figura 2.1, los volcanes suelen formarse en tres tipos de ambientes: margen de placas divergentes, margen convergentes y regiones intraplaca asociados a *hotspots*. En los márgenes convergentes, una placa tectónica subduce debajo de otra, con una trayectoria oblicua hacia el manto superior, hasta que alcanza una profundidad en la que la placa subducida se deshidrata o se funde, formando el magma que asciende por fisuras y luego es expulsada hacia la superficie en forma de erupción. Los magmas creados en profundidad evolucionan y dan origen a una amplia variedad composicional, y sus estilos eruptivos están dominados por actividad efusiva, a otros altamente explosivos. En los márgenes divergentes, las placas tectónicas se separan, lo que produce un ascenso de material desde el manto, que al enfriarse crea nueva corteza oceánica. En la medida en que las placas se separan del eje de la dorsal, las fracturas creadas se rellenan nuevamente con roca fundida y en el proceso se forman volcanes. Los magmas emitidos por estos volcanes son poco diferenciados, en su mayoría de composición basáltica, y el estilo eruptivo es principalmente efusivo. Los *hotspots* son comúnmente asociados a plumas del manto que, manteniendo su posición fija bajo placas litosféricas que se desplazan, resultan en cadenas de islas volcánicas y montes submarinos de naturaleza generalmente basáltica, donde el volcanismo que se origina es mayormente del tipo efusivo (SERNAGEOMIN, 2018).

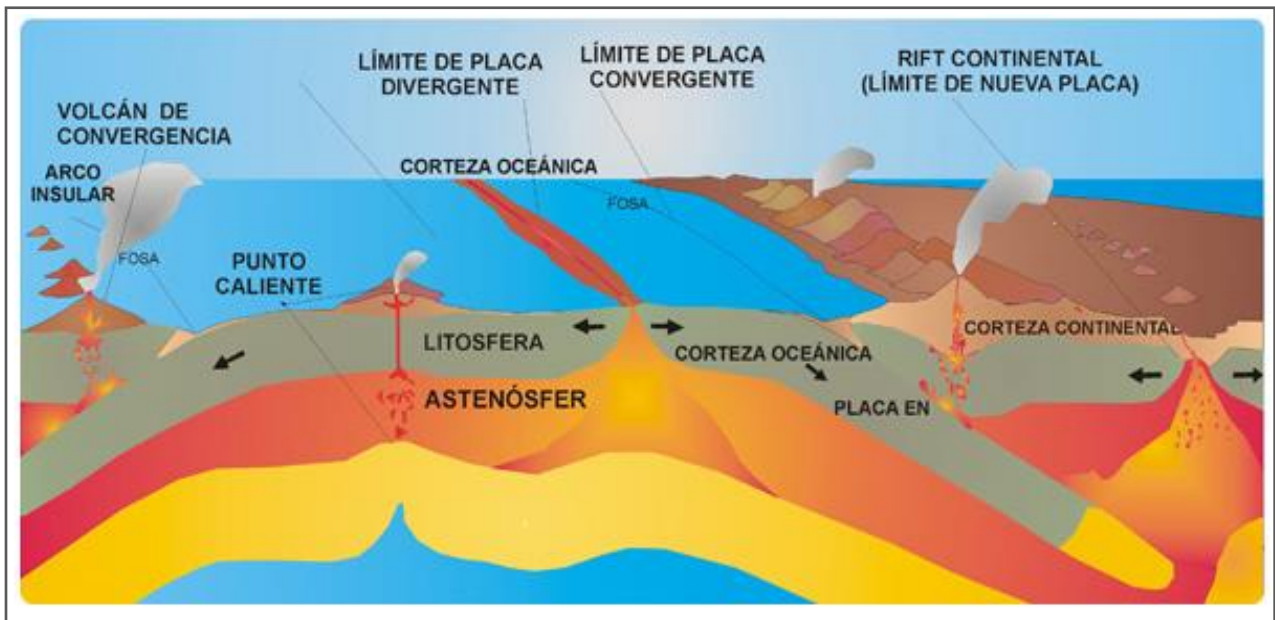


Figura 2.1. Zonas de formación de volcanes (http://ovi.ingemmet.gob.pe/?page_id=96).

La Figura 2.2. muestra la localización de los volcanes que han tenido alguna erupción durante el Holoceno y/o en tiempos históricos. Esto confirma que el volcanismo está asociado al movimiento de las placas tectónicas, y explica por qué la mayoría de las áreas volcánicas activas de nuestro planeta se concentran principalmente en los límites de placas (Simkin *et al.*, 2006). Incluso, Blodgett & Keller (2007) señalan que más del 80% de las erupciones volcánicas de la historia provienen de volcanes situados por encima de las zonas de subducción, en los márgenes convergentes. Estos, en su mayoría, forman el “anillo de fuego” del Pacífico, que comprende tanto cadenas de volcanes insulares (Indonesia; Filipinas) como de volcanes continentales (los Andes) que tienen el potencial de ser altamente explosivos (Loughlin *et al.*, 2015).

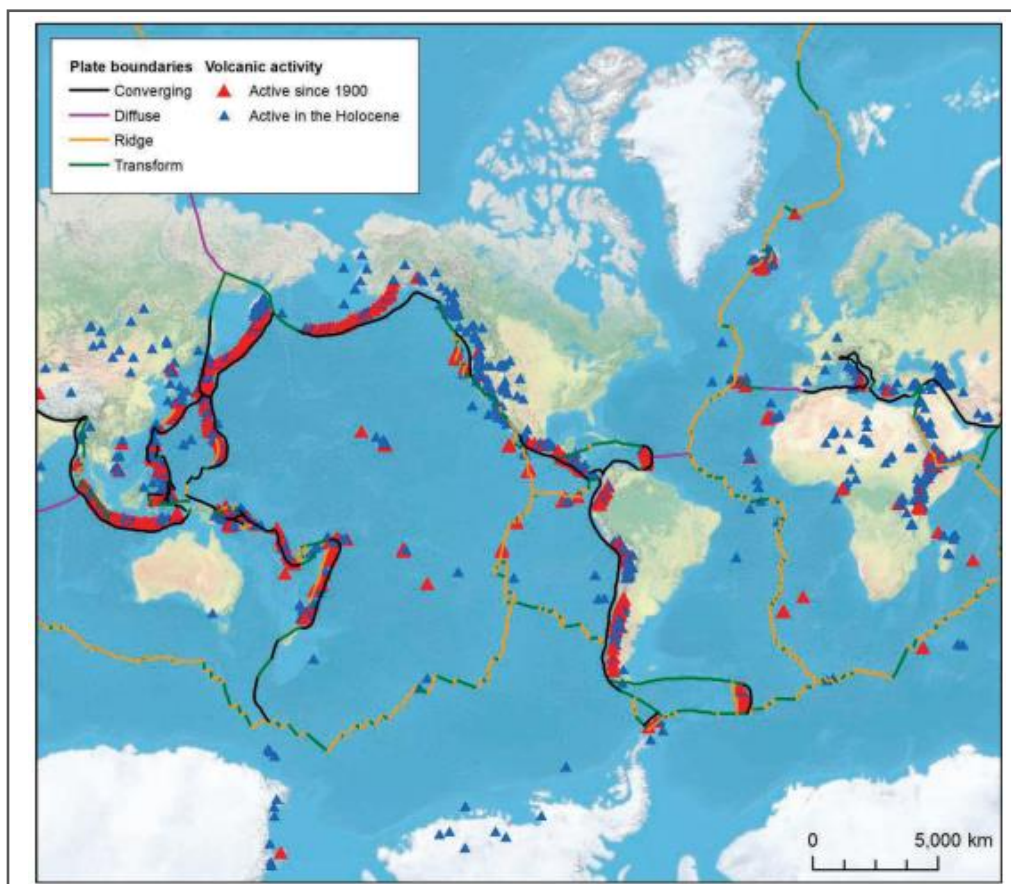


Figura 2.2. Mapa global de la localización y el estado de los volcanes del Holoceno. La distribución de los volcanes también delinea los límites de las principales placas tectónicas (Loughlin *et al.*, 2015).

El tipo de volcanismo determinará el magma que se expulse, el tipo de erupción que este posiblemente tendrá y, en consecuencia, los tipos de peligro que generarán (SERNAGEOMIN, 2018). Como se ilustra en la Figura 2.3., los volcanes durante procesos eruptivos, expulsan a la superficie de la Tierra diversos tipos de productos:

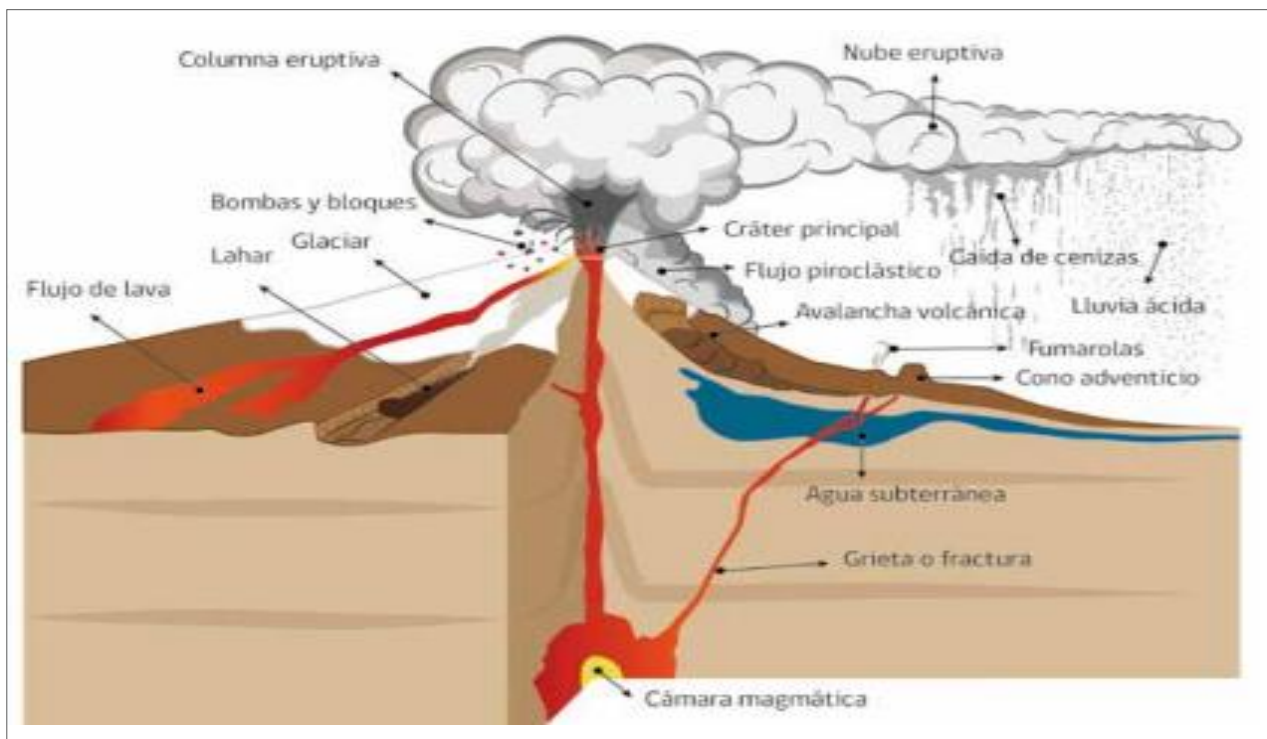


Figura 2.3. Esquema sobre procesos volcánicos (SERNAGEOMIN, 2018).

LAHAR: flujo de sedimentos saturados en agua constituido por una gran descarga de fragmentos volcánicos que se origina en las laderas de los volcanes. Estos flujos se denominan primarios si ocurren durante la actividad eruptiva y secundarios si son posteriores a la erupción. Las fuentes del agua para movilizar los lahares pueden ser las siguientes: fusión del hielo y/o nieve por eyección volcánica caliente; lagos de cráter y otras aguas superficiales; agua en los sistemas geotérmicos y de aguas subterráneas; y lluvias torrenciales (Tilling, 2005). Las velocidades medidas de los lahares históricos han variado mucho según el volumen, la distribución del tamaño de los granos, las dimensiones y la configuración del canal y el gradiente de la pendiente, oscilando entre 1 y 40 m/s, con valores medios del orden de 10–20 m/s (Macdonald, 1972; Janda *et al.*, 1981; Blong, 1984). Estos flujos siguen las depresiones topográficas, pero con frecuencia los lahares de alta velocidad y gran volumen se desbordan y/o bloquean los canales y embalsa los lagos en los valles tributarios, donde recorren cientos de kilómetros. Los espesores de los flujos individuales alcanzan unos pocos metros, pero los depósitos acumulados pueden ser decenas de metros (Blong, 1996). Debido a su alta densidad aparente y velocidad, los lahares representan un gran peligro a lo largo de los valles que drenan el volcán, ya que tienen el potencial de destruir puentes y caminos, enterrar edificios y cortar rutas de escape, afectando directamente áreas a decenas de kilómetros de un volcán y causando inundaciones a distancias aún mayores (Loughlin *et al.*, 2015). Debido al gran alcance que tienen los lahares, que afecta incluso a las comunidades que se encuentran a grandes distancias del volcán (Tilling, 2005), y a que el peligro puede continuar durante meses,

incluso años, después de la erupción (Blong, 1996), los lahares representan el 15% de todas las fatalidades volcánicas históricas (Auker *et al.*, 2013).

FLUJO DE LAVA: fundido silicatado que incluye una fase líquida, una gaseosa y también fracciones sólidas o cristalinas, que se forman por el rápido enfriamiento en superficie de la roca fundida (800 y 1200 °C) durante una erupción (Wilson *et al.*, 2014), definiendo una textura afanítica caracterizada por el reducido tamaño de los cristales. Los flujos de lava constituyen los peligros volcánicos más comunes de erupciones no explosivas, especialmente en sistemas basálticos. La distancia que puede recorrer un flujo de lava desde el respiradero o de alguna fisura depende de su viscosidad (determinada por su temperatura, composición química, contenido de gas y la cristalinidad), la tasa de efusión y la pendiente del terreno (Tilling, 2005). Aquellas lavas con menor contenido de sílice (basáltica) suelen ser muy fluidas, cuyos espesores no sobrepasan 1-2 m y su velocidad de flujo es mayor (> 60 km/h), con respecto a las lavas más ricas en sílice (pocas decenas de m/h), que, al desplazarse a baja velocidad, dan origen a coladas de bloques o incluso domos (SERNAGEOMIN, 2018) de decenas de metros que cubren solo unos pocos kilómetros cuadrados. Por otro lado, a velocidades de efusión bajas (<10 m³/s), la lava tiende a producir pequeños flujos que se encharcan y acumulan cerca del respiradero, mientras que a tasas más altas (10¹–10³ m³//s), las lavas producidas pueden recorrer decenas de kilómetros y cubrir cientos de kilómetros cuadrados. Estos flujos siguen las depresiones topográficas, por lo que una vez que se identificaron los potenciales respiraderos, sus caminos se pueden predecir en función de la topografía circundante (Blong, 1996; Tilling, 2005). Debido a su lento movimiento, los flujos de lava rara vez amenazan la vida humana, pero pueden ser muy destructivos, enterrando, aplastando o quemando todo a su paso. Además, las lavas más diferenciadas o silíceas generan domos, que pueden tender a un colapso parcial o total si aumenta la presión de los gases en su interior, desencadenando otro tipo de peligro: flujos y oleadas piroclásticas (Loughlin *et al.*, 2015).

CORRIENTES DE DENSIDAD PIROCLÁSTICA: flujo y oleada formada por piroclastos, fragmentos de roca y gases que se desplazan a gran temperatura (300 – >800 °C) y velocidad (100 a 500 km/h) por las laderas de un volcán y a lo largo de depresiones topográficas. Son comunes en muchos volcanes de composición andesíticos y dacíticos y en calderas silíceas. La mayoría se origina por el colapso de una columna eruptiva explosiva, densa y cargada de partículas, por explosiones laterales dirigidas, o bien por un colapso parcial y/o explosión de domos de lava (Tilling, 2005). Estos peligros son impulsados por la gravedad y recorren distancias de decenas de kilómetros (Wilson *et al.*, 2014). Los flujos piroclásticos son avalanchas concentradas (densas) de rocas volcánicas, cenizas y gases que generalmente se limitan a los valles, y recorren distancias desde 5-10 km, hasta 50-100 km. En tanto, las oleadas piroclásticas son nubes turbulentas más

diluidas de cenizas y gases, que rara vez superan los 100 mm de diámetro, y que pueden propagarse rápidamente dentro de un radio de 10-15 km (Blong, 1996; Carey *et al.*, 1996). Las oleadas piroclásticas pueden ser calientes o frías, en el primer caso están estrechamente asociadas con los flujos piroclásticos, ambos generados por los mismos procesos. Sin embargo, las oleadas piroclásticas frías son generadas por explosiones hidromagmáticas o hidrotermales (Scott, 1989). Debido a la diferencia de densidad, los flujos piroclásticos tienden a estar más controlados por la topografía, principalmente restringidos a los fondos de los valles, mientras que las oleadas menos densas y más móviles pueden propagarse rápidamente por sobre estas áreas. Además de estos efectos directos, los flujos piroclásticos pueden mezclarse con agua superficial o agua derretida de la nieve y el hielo para formar lahares destructivos e inundaciones que puede afectar a los valles aguas abajo (Tilling, 2005). Por todas estas evidencias, las corrientes de densidad piroclástica son el peligro volcánico más letal y representan un tercio de todas las víctimas mortales históricas producto de actividad volcánica (Auker *et al.* 2013). Testigos oculares han informado que los flujos piroclásticos y las oleadas emiten poco sonido, por lo que es posible que no ofrezcan una advertencia de su avance si no se ven (Loughlin *et al.*, 2002), por lo que la única respuesta adecuada a la amenaza de una inminente corriente de densidad piroclástica es la evacuación (Loughlin *et al.*, 2015).

AVALANCHA VOLCÁNICA: flujos muy grandes y notablemente móviles de detritos volcánicos formados por el colapso parcial o total de un edificio volcánico (Loughlin *et al.*, 2015). Se desplaza a velocidades que pueden alcanzar los 300 km/h, y arrastra bloques de varias toneladas y metros de diámetro. Las avalanchas de gran volumen (decenas de kilómetros cúbicos) pueden extenderse hasta 85 km más allá de sus fuentes y pueden depositar material volcánico de decenas de metros de espesor en áreas de 10² a 10³ km² (Siebert, 1996). Este tipo de avalanchas crean topografía, embalsan lagos y cruzan barreras topográficas de más de 1000 m de altura (Blong, 1996), enterrando y destruyendo todo a su paso. Además, las avalanchas volcánicas saturadas en agua pueden transformarse en lahares (Tilling, 2005), incrementando aún más su peligrosidad. Las avalanchas también pueden causar peligros indirectos, cuando los productos volcánicos ingresan a lagos o bahías y repentinamente desplazan grandes volúmenes de agua para producir olas altas, o ingresan al mar para generar tsunamis volcánicos (Scott 1989; Siebert, 1984).

CAÍDA DE TEFRA: caída de material fragmentado (piroclastos) que emiten los volcanes durante las erupciones explosivas, proveniente desde columnas eruptivas y transportada a favor del viento hasta 40– 50 km en vertical y miles de kilómetros en lateral. Corresponden a partículas vítreas (vidrio volcánico), cristalinas y/o líticas. En función del tamaño se clasifican en ceniza (< 2 mm), lapilli (2 - 64 mm), bloques y bombas (> 64 mm) (Wilson *et al.*, 2014). La dispersión de las cenizas

volcánicas depende principalmente de las condiciones meteorológicas, incluidos el viento (velocidad y dirección) y la humedad, la distribución del tamaño de los granos de las cenizas y la altura de la columna volcánica, que depende de la temperatura del material erupcionado y la tasa de erupción. La tefra generalmente se vuelve de grano más fino y forma depósitos de menor espesor, a medida que aumenta la distancia a favor del viento desde el respiradero eruptivo (Tilling, 2005). La caída de ceniza constituye el proceso de caída más común, es el peligro volcánico más frecuente, y a menudo más extendido, y si bien, rara vez pone en peligro la vida humana directamente, ocasiona daños severos a la flora, fauna, agricultura, aeronavegación, infraestructuras críticas (daños estructurales, derrumbe de los techos de las edificaciones, interrupción del suministro eléctrico, sistemas de agua, energía, transporte y comunicaciones), y otras actividades socioeconómicas en áreas potencialmente muy grandes. Además, las emisiones de material particulado son el principal factor de riesgo para la salud de las personas (Loughlin *et al.*, 2015; Spence *et al.*, 2005; Tilling, 2005; Wilson *et al.*, 2012).

BALÍSTICOS: corresponde a un tipo de piroclasto, mayor a 64 mm de diámetro (bloque o bomba), eyectado con trayectoria balística o parabólica a alta velocidad (decenas a cientos de m/s) desde el cráter del volcán durante erupciones explosivas, de forma aerodinámica producto de su trayectoria en el aire (Loughlin *et al.*, 2015). Constituyen otro tipo de caída de tefra, pero más localizado, ya que sus áreas de impacto están típicamente restringidas a un radio de 3 a 5 km de los respiraderos, donde la dirección y la velocidad del viento tienen poco efecto, y dependiendo de su tamaño, que por lo general va de decímetros a un par de metros, pueden formar cráteres de impacto en su caída (Blong, 1984; Blong, 1996). Sin, embargo, los impactos más directos, son las muertes, lesiones y daños estructurales, y los balísticos muy caliente puede provocar incendios (Loughlin *et al.*, 2015).

GASES: los magmas contienen cantidades variables de gases disueltos (volátiles) que se mantienen en la roca fundida por presión de confinamiento, pero escapan durante la reducción de la presión a medida que el magma se mueve hacia la superficie. La porción gaseosa de la mayoría de los magmas constituye entre 1-6% del peso total (SERNAGEOMIN, 2018) y, la mayor parte, está formada por vapor de agua (60-99%), también se registran contenidos de dióxido de carbono (hasta el 10 %), dióxido de azufre y otros gases de azufre (hasta el 15 %), halógenos (incluidos el flúor y el cloro, hasta el 5 %), varios metales como el mercurio y el plomo (cantidades traza) y trazas de monóxido de carbono. Los gases volcánicos pueden causar directamente muertes, impactos en la salud y daños a la vegetación, el ganado, la infraestructura y la propiedad, y su impacto varía ampliamente y depende de la cantidad y tipo de gas emitido, el nivel al que se inyecta a la atmósfera, la topografía local y las condiciones meteorológicas del momento (Loughlin *et al.*,

2015). El dióxido de carbono (CO₂) es más denso que aire y fluiría silenciosamente a lo largo del suelo acumulándose en depresiones. Los gases de azufre, en particular el dióxido de azufre, son tóxicos en altas concentraciones y se convierten en partículas de sulfato en la atmósfera, una de las principales causas de la contaminación del aire (Schmidt *et al.*, 2011), ya que incrementan la acidez de la atmósfera, creando lluvia ácida (pH 4.0-4.5) (Blong, 1996). Los gases que contienen flúor y cloro también pueden ser peligrosos y pueden adherirse a las superficies de las cenizas volcánicas. Las personas y los animales pueden verse afectados por el envenenamiento por fluoruro si consumen agua, suelo, vegetación o cultivos afectados (Loughlin *et al.*, 2015).

2.2. PELIGRO VOLCÁNICO

En la literatura, la palabra peligro se usa de manera ambigua, a veces para referirse a las características físicas de una erupción y, a veces, para referirse a los efectos de las erupciones en los humanos, sus posesiones y actividades (Blong, 1996). Según Fournier d'Albe (1979 en Tilling, 1993), el peligro volcánico corresponde a “la probabilidad de que un área determinada se vea afectada por procesos o productos volcánicos potencialmente destructivos dentro de un período de tiempo determinado”. Sin embargo, para efectos de este trabajo, el peligro volcánico se define como “los fenómenos naturales peligrosos o destructivos producidos por un volcán”, según como lo señala Ewert *et al.* (2005).

Los volcanes exhiben una amplia gama de estilos eruptivos y, por lo tanto, producen una variedad de peligros volcánicos que presentan diferentes características físicas, afectan diferentes áreas, ocurren con diferentes frecuencias (Blong, 1996). Esta variedad de comportamientos surge debido a los procesos complejos y no lineales involucrados en la generación y suministro de magma a la superficie terrestre (Cashman *et al.*, 2013). La interacción subsiguiente del magma en erupción con ambientes superficiales como el agua o el hielo puede alterar aún más las características de las erupciones y, por lo tanto, sus impactos (Loughlin *et al.*, 2015). Por ejemplo, los lahares y las corrientes de densidad piroclásticas son los peligros volcánicos que más víctimas ocasionan, mientras que las lavas los que menos. Esta gran diversidad de comportamientos y peligros consiguientes significa que cada volcán debe ser evaluado y monitoreado individualmente por un observatorio de volcanes (Loughlin *et al.*, 2015), con el objetivo de conocer la dinámica volcánica, el dónde y cómo se generan los magmas, sus propiedades físico-químicas, sus tipos de rocas, productos y formas de la actividad volcánica.

Las erupciones volcánicas generalmente se miden por magnitud y/o intensidad (Pyle, 2015). La magnitud de una erupción se define como la masa total erupcionada (kg), mientras que la intensidad se define como la tasa de erupción o flujo de masa (kg/s). Para comparar el tamaño de diferentes tipos de erupciones, se suele utilizar una escala de magnitud. Una alternativa muy utilizada para caracterizar y comparar el tamaño de erupciones puramente explosivas es el Índice de Explosividad Volcánica (VEI) que comprende una escala (logarítmica) de 0 a 8 (Figura 2.4). El VEI generalmente se basa en el volumen de material que erupcionó durante una erupción explosiva y también en la altura de la columna de ceniza en erupción (Newhall & Self, 1982).

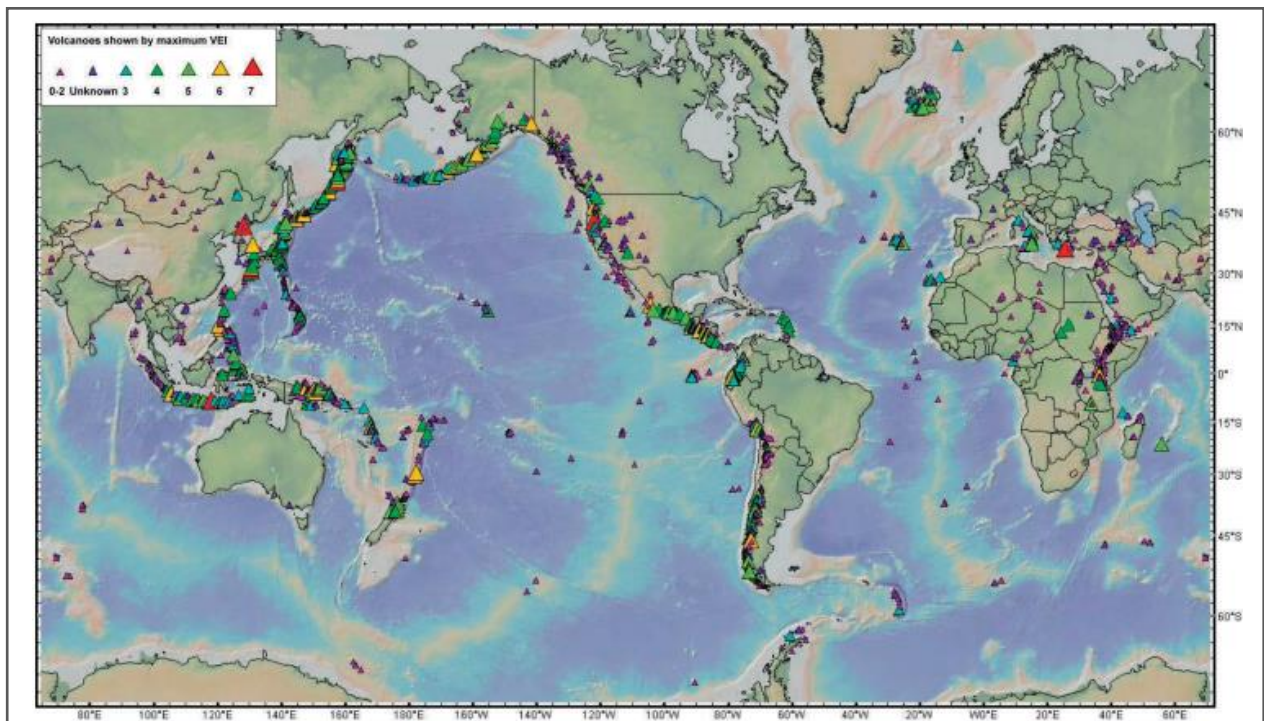


Figura 2.4. Se muestra el VEI máximo registrado de los volcanes potencialmente peligrosos (Loughlin *et al.*, 2015). Las erupciones pequeñas (VEI 0-2) y las erupciones de tamaño desconocido se muestran en púrpura y azul oscuro. Los registros corresponden al Holoceno (los últimos ~10.000 años).

En general, existe una mayor probabilidad de muertes a medida que aumenta la magnitud de la erupción. Sin embargo, las erupciones pequeñas a moderadas pueden ser devastadoras (Loughlin *et al.*, 2015), ya que existe un gran número de peligros de gran poder destructivo asociados al volcanismo que no requieren una elevada explosividad (deslizamientos laterales, lahares, flujos de lavas, etc). Un análisis estadístico de todos los incidentes volcánicos, destaca el hecho de que las erupciones VEI 2-3 tienen más probabilidades de causar un incidente volcánico fatal de cualquier escala y las erupciones VEI 3-4 tienen más probabilidades de tener los números más altos de muertes (Auker *et al.*, 2013). Por otro lado, en la Figura 2.5 se muestra el número de erupciones ocurridas en el mundo durante el Holoceno y sus VEI. Donde se observa que mientras mayor VEI

alcanza una erupción, menor es su recurrencia; mientras que los eventos de menor VEI son más recurrentes. En general, cuanto más largo sea el intervalo de reposo entre erupciones, más explosiva (mayor VEI) será la próxima erupción.

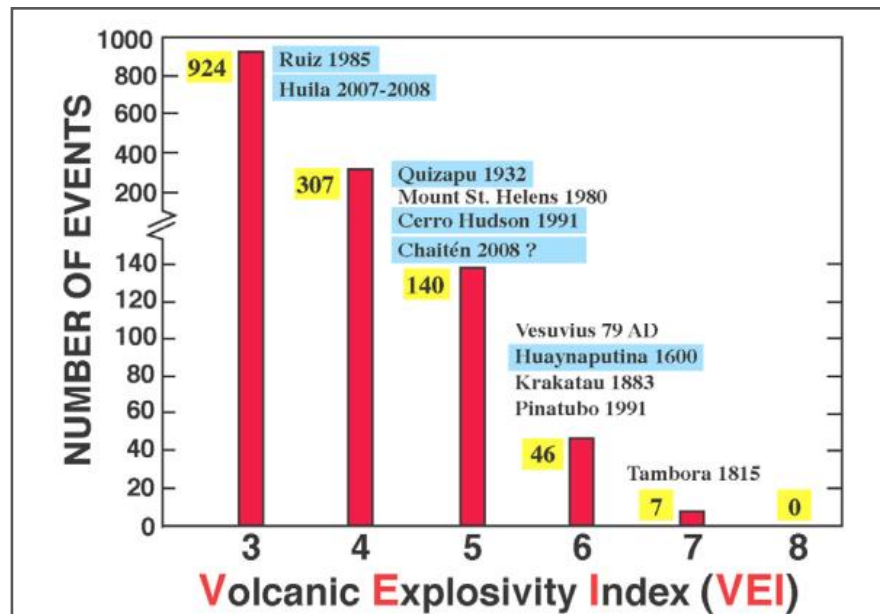


Figura 2.5. Histograma de las erupciones explosivas en el mundo clasificadas por su VEI ocurridas durante el Holoceno (Tilling, 2009).

Tal como fue resumido por Crandell *et al.* (1984 en Tilling, 1993), los datos esenciales necesarios para una evaluación adecuada de los peligros deberían incluir lo siguiente: los registros completos de las erupciones históricas; la actividad eruptiva prehistórica, deducida del registro geológico; datos geológicos (estratigráficos, petrológicos y geoquímicos) sobre la naturaleza, distribución y volumen de los productos eruptivos, y la datación de los productos volcánicos y de los eventos interpretados a partir de los mismos.

Las evaluaciones de peligros generalmente toman la forma de mapas, que, por lo general, se basan en uno o más peligros volcánicos y en el conocimiento de erupciones pasadas de estudios geológicos y registros históricos durante un período de tiempo determinado (Loughlin *et al.*, 2015). Los mapas de peligro deben ilustrar los tipos de peligro volcánico que se pueden esperar y las áreas que probablemente se verán afectadas (Blong, 1996).

Los mapas de peligros se pueden usar para múltiples propósitos, como crear conciencia sobre los peligros e identificar los impactos probables para permitir una planificación efectiva del uso de la tierra y ayudar a los administradores de emergencias a mitigar los riesgos (Lockwood & Hazlett, 2013). Una vez que ha comenzado una erupción volcánica, los mapas de peligros pueden volverse

rápidamente obsoletos, por lo que pueden ser necesarias actualizaciones frecuentes de algunos mapas de peligros. (Loughlin *et al.*, 2015).

La comprensión del comportamiento eruptivo, su recurrencia y las condiciones geomorfológicas actuales permiten realizar la evaluación de peligrosidad, la que se entrega a la ciudadanía en productos cartográficos, como lo son los mapas de peligro volcánico elaborados por el SERNAGEOMIN. En ellos se zonifican de manera integrada los distintos niveles de peligro, en base al área susceptible a ser afectada por un proceso, el impacto o severidad de cada proceso y su recurrencia. Las áreas de muy alto o alto peligro representan las zonas que con mayor frecuencia han sido afectadas por erupciones volcánicas, mientras que áreas de bajo peligro corresponden a aquellas que se ven expuestas con menor recurrencia (SERNAGEOMIN, 2018).

2.3. EXPOSICIÓN VOLCÁNICA

De acuerdo a la terminología de la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR), la exposición se define como “la población, las propiedades, los sistemas u otros elementos presentes en las zonas donde existen peligros y, por consiguiente, están expuestos a experimentar pérdidas potenciales.” Llinares *et al.* (2004) indican que la exposición representa el valor de los bienes sujetos a posibles pérdidas, siendo su valor cero cuando no hay ningún bien presente en el área afectada por un fenómeno natural. Por su parte, Adger (2006) y Hufschmidt (2011) señalan que la exposición corresponde a una precondition para una situación de peligro, es decir “el contexto social y material representado por las personas y por los recursos, producción, infraestructura, bienes y servicios, que se encuentran dentro del área de influencia directa de un fenómeno o evento físico” (Lavell, 2007). A su vez, (Birkmann, 2013; Scaini *et al.*, 2014 en Jiménez, 2019) determinan que la exposición cuantifica el valor social, económico, ambiental, cultural y estratégico en áreas que podrían verse potencialmente afectadas por un peligro determinado. Sin embargo, y para efectos de este trabajo, el grado de exposición se expresa cuantitativamente en el número de elementos potencialmente afectados, y pueden incluir la cantidad de personas o los tipos de bienes en una zona, sin considerar su aspecto económico o vulnerabilidad.

Estos elementos expuestos, dentro del contexto de la emergencia, pueden agruparse en instalaciones críticas, tales como hospitales, establecimientos educacionales, bomberos, etc., o en instalaciones estratégicas, relacionadas con los servicios energéticos, de telecomunicaciones, entre otros. Si estos elementos se sitúan en territorios peligrosos, la recuperación de la sociedad que

hace uso de ellos se hace más lenta y compleja (Chardon, 2002). Esto se estudia mediante la determinación de la localización geográfica y de las características de cada elemento expuesto (Yamin *et al.*, 2013).

2.4. AMENAZA VOLCÁNICA

La definición utilizada para este estudio coincide con la propuesta por NVEWS, en donde Ewert *et al.* (2005) señalan que la amenaza volcánica es “la combinación de peligros (los fenómenos naturales peligrosos o destructivos producidos por un volcán) y exposición (las personas y propiedades en riesgo de los fenómenos volcánicos)”. Así, la amenaza que representa un volcán para las personas y la propiedad es independientemente de los esfuerzos de mitigación (Ewert, 2007), y, por ende, es independiente de la vulnerabilidad, ya que no considera el valor económico ni cultural de los elementos expuestos a los peligros volcánicos.

En algunos países sudamericanos la palabra ‘amenaza’ se utiliza como sinónimo de ‘peligro’. Sin embargo, el peligro volcánico hace referencia a los productos emitidos durante una erupción, mientras que la amenaza depende de que puedan verse afectadas personas, propiedades e infraestructuras a estos peligros. Teniendo en cuenta esto se puede decir, por ejemplo, que el volcanismo asociado a zonas de subducción es en general altamente peligroso y, si la erupción tiene lugar en una zona densamente habitada y/o con infraestructuras, tendrá una elevada amenaza. Por otro lado, si los peligros volcánicos derivados de la erupción no afectan a ninguna persona y/o infraestructura, no existiría exposición, y, por ende, tampoco amenaza.

2.5. VULNERABILIDAD

La vulnerabilidad es un factor esencial para el análisis de riesgo frente a una erupción volcánica, ya que involucra el análisis de los efectos sobre los elementos importantes para el funcionamiento de la sociedad.

El análisis de vulnerabilidad debe determinar la respuesta (resistencia) a los peligros volcánicos de los elementos (personas, propiedades, infraestructuras, etc.) en riesgo de ser afectados por erupciones volcánicas, y llevar a cabo evaluaciones de impacto basadas en escenarios eruptivos dados (Gehl *et al.*, 2013).

Llinares *et al.* (2004) definen la vulnerabilidad como “el porcentaje esperado de daño (pérdida) que van a sufrir los bienes expuestos si ocurre el evento y se expresa en % del valor total del

elemento en riesgo”. Este valor, al ser un concepto estadístico, hay que calcularlo para todos los elementos similares (igual tipo de construcción, de cultivo, etc.).

En tanto, Loughlin *et al.* (2015) señala que la vulnerabilidad tiene muchas formas que pueden incluir física, social, organizacional, económica y ambiental. En términos de vulnerabilidad social, las comunidades marginadas geográfica, social o políticamente suelen ser las más vulnerables. Dentro de estas comunidades, los jóvenes, los ancianos y los enfermos son algunos de los individuos más vulnerables. La resiliencia de los medios de vida se reconoce cada vez más como un factor clave que juega un papel en la vulnerabilidad de comunidades e individuos. Las vulnerabilidades físicas suelen estar estrechamente asociadas con las vulnerabilidades sociales y pueden incluir, por ejemplo, el tipo y la calidad del techo y la calidad de las rutas de evacuación y el transporte. La evaluación de la vulnerabilidad de los sistemas críticos que apoyan a las comunidades aborda específicamente la naturaleza compleja de la vulnerabilidad con sus muchas variables y permite el análisis de resiliencia (Sword-Daniels, 2011). Idealmente, las vulnerabilidades se evalúan a nivel comunitario y con una sólida comprensión del panorama social, cultural, económico y político local.

2.6. RIESGO VOLCÁNICO

Foumier d'Albe (1979 en Tilling, 1993), define el riesgo volcánico como “la posibilidad de una pérdida, como la vida, la propiedad, la capacidad productiva, etc., dentro del área expuesta al peligro”. Por lo tanto, la evaluación del riesgo involucra la consideración de la relación:

$$\text{riesgo} = (\text{valor}) \times (\text{peligro}) \times (\text{vulnerabilidad})$$

Donde el ‘valor’ puede incluir el número de vidas, bienes y obras civiles (exposición), y la capacidad productiva amenazada, y la vulnerabilidad es una medida de la proporción (0 a 100%) del valor que probablemente se perderá en un evento peligroso dado.

Cardona (1992) indica que la diferencia fundamental entre el peligro y el riesgo está, en que el peligro está relacionado con la manifestación de un evento natural, mientras que el riesgo está relacionado no sólo con el grado de exposición de los elementos sometidos sino con la vulnerabilidad que tienen dichos elementos a ser afectados por el evento.

Teniendo en cuenta lo anterior, Llinares *et al.* (2004) señalan que el daño causado por una erupción volcánica depende en primer lugar del tipo y magnitud de la erupción, de la distancia entre el elemento de riesgo y la fuente origen de peligro, de la topografía, del viento y de otras

variables meteorológicas, de la vulnerabilidad y finalmente de todas aquellas medidas que se hayan tomado por parte del hombre para mitigar en lo posible el riesgo (alarmas, sistemas de vigilancia, planes de evacuación, etc.).

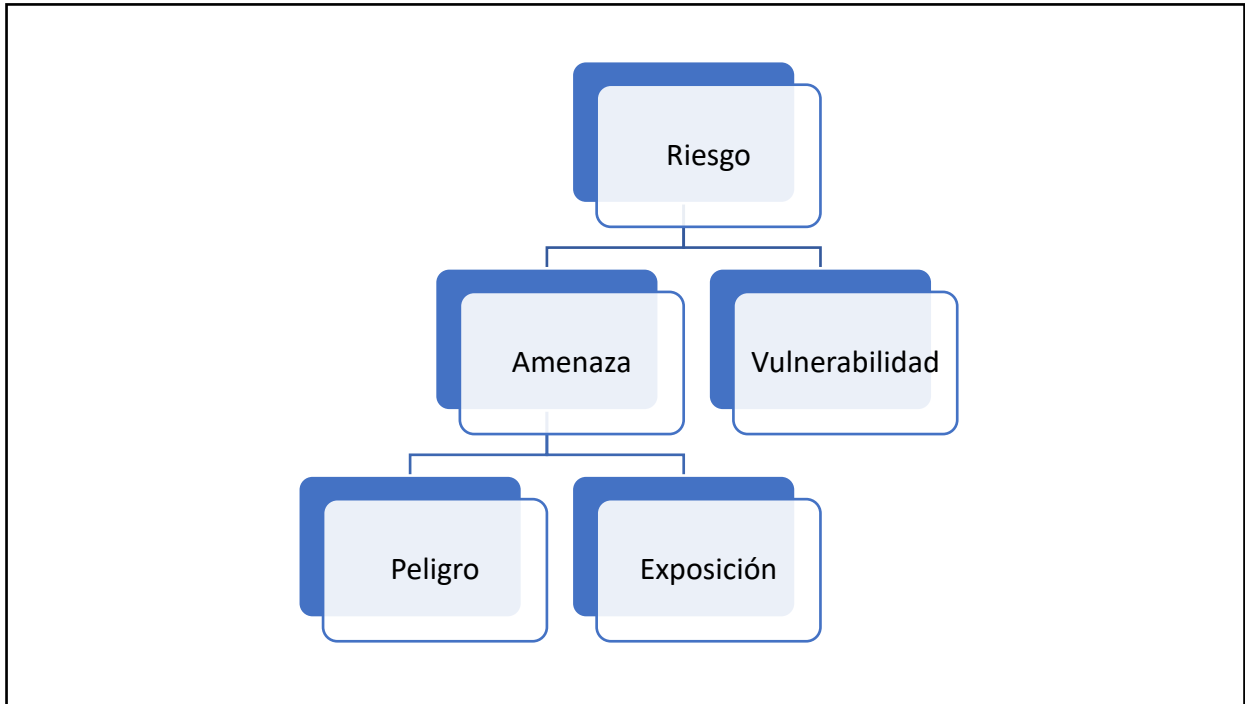


Figura 2.6. Esquema que representa la relación entre los conceptos utilizados en este estudio. El riesgo se mide en función de la amenaza y la vulnerabilidad. La amenaza a su vez, corresponde a la integración del peligro con la exposición.

3. MARCO VOLCANOLÓGICO

3.1. COMPLEJO VOLCÁNICO TAAPACÁ

El complejo volcánico Taapacá (18°06'S, 69°30'W) consiste en un estratovolcán andesítico y un complejo de domo de lava dacítico de 5.850 m s.n.m, que se localiza a 11 km al NE del pueblo de Putre, provincia de Parinacota, en la región de Arica y Parinacota (Polanco *et al.*, 2008). Este complejo de grandes dimensiones (35 km³), ha estado activo desde el Plioceno Superior (<1,5 Ma) (Clavero & Sparks, 2005). Los principales productos emitidos por este complejo corresponden a lavas y domos, y a depósitos piroclásticos de bloques y cenizas asociados, además de la ocurrencia de colapsos parciales que han generado avalanchas de detritos volcánicos durante el Pleistoceno Medio a Superior, estrechamente ligadas al crecimiento de domos y explosiones dirigidas (Polanco *et al.*, 2008). La evolución geológica de este complejo ha sido dividida en cuatro estadios, sobre la base de criterios stratigráficos, morfológicos, geocronológicos y geoquímicos (Clavero & Sparks, 2005). En la actualidad presenta solo vertientes termales sulfurosas, no habiendo evidencias de actividad histórica (última erupción hace 2000 años).

3.1. 1. Rocas del basamento e intrusivas

El basamento del complejo volcánico está formado por una secuencia volcánica fuertemente deformada del Oligoceno Superior-Mioceno Inferior conocida como la Formación Lupica (Montecinos, 1963; Pacci *et al.*, 1980; García, 2001), compuesta principalmente de ignimbritas riolíticas, lavas de andesita y rocas epiclásticas que han sido fuertemente plegadas durante el Mioceno (Muñoz & Sepúlveda, 1992; Muñoz & Charrier, 1996 en Clavero *et al.*, 2004), además de secuencias volcánicas y volcanoclásticas principalmente andesíticas del Mioceno Medio a Tardío al Plioceno (García, 2001; García *et al.*, 2004), secuencias sedimentarias lacustres del Mio-Plioceno de la Formación Huaylas (Salas *et al.*, 1966; García *et al.*, 2004), y la Ignimbrita de Lauca riolítica del Plioceno (Wörner *et al.*, 2000a; García, 2001).

3.1. 2. Rocas y depósitos volcánicos

La actividad eruptiva ha ocurrido en cortos periodos, seguido de prolongados intervalos de reposo, en donde se reconocen cuatro etapas de evolución del complejo (Clavero & Sparks, 2005), que se inicia con la emisión de coladas de lava andesíticas (59-61% de SiO₂) poco preservadas que habrían construido un paleovolcán (Estadio I) y posteriormente, la generación de lavas y domos dacíticos con hornblenda, biotita y megacristales de sanidina e inclusiones máficas (estadios II al IV), acompañadas de colapsos, avalanchas de detritos, explosiones dirigidas asociadas, y la generación de depósitos piroclásticos de bloques y ceniza, que se han dirigido hacia el SW del

complejo, debido a la migración del foco principal de emisión hacia el SW en 4 a 5 km en los últimos 1.5 Ma. (Polanco *et al.*, 2008).

3.1. 3. Historia eruptiva y peligros volcánicos

No existen a la fecha reportes sugerentes de actividad eruptiva histórica y su último evento eruptivo, reconocido hasta ahora, ocurrió hace unos 2.000 años (Clavero, 2007). No obstante, corresponde a uno de los volcanes de mayor peligrosidad del norte de Chile dado su carácter eruptivo y la cercanía de Putre, ubicada en el flanco suroeste del complejo (SERNAGEOMIN, 2018). Según Clavero & Sparks (2005), una posible reactivación de este centro eruptivo generaría avalanchas de detritos volcánicos, producto del colapso de la intrusión de domos dacíticos; flujos piroclásticos de bloques y ceniza, oleadas piroclásticas, caídas piroclásticas, lahares y explosiones dirigidas hacia el sector suroccidental, que podrían afectar directamente a este poblado. Este complejo no ha generado, en su historia eruptiva, columnas eruptivas de gran altura. Por esto, durante un nuevo ciclo eruptivo, es posible que se generen columnas de baja altura, asociadas a desgasificación y explosiones de domos, cuyas cenizas podrían ser dispersadas por los vientos predominantes en el área, afectando zonas cercanas hacia el sureste del complejo (Clavero, 2007), como representa la envolvente en la Figura 3.1.

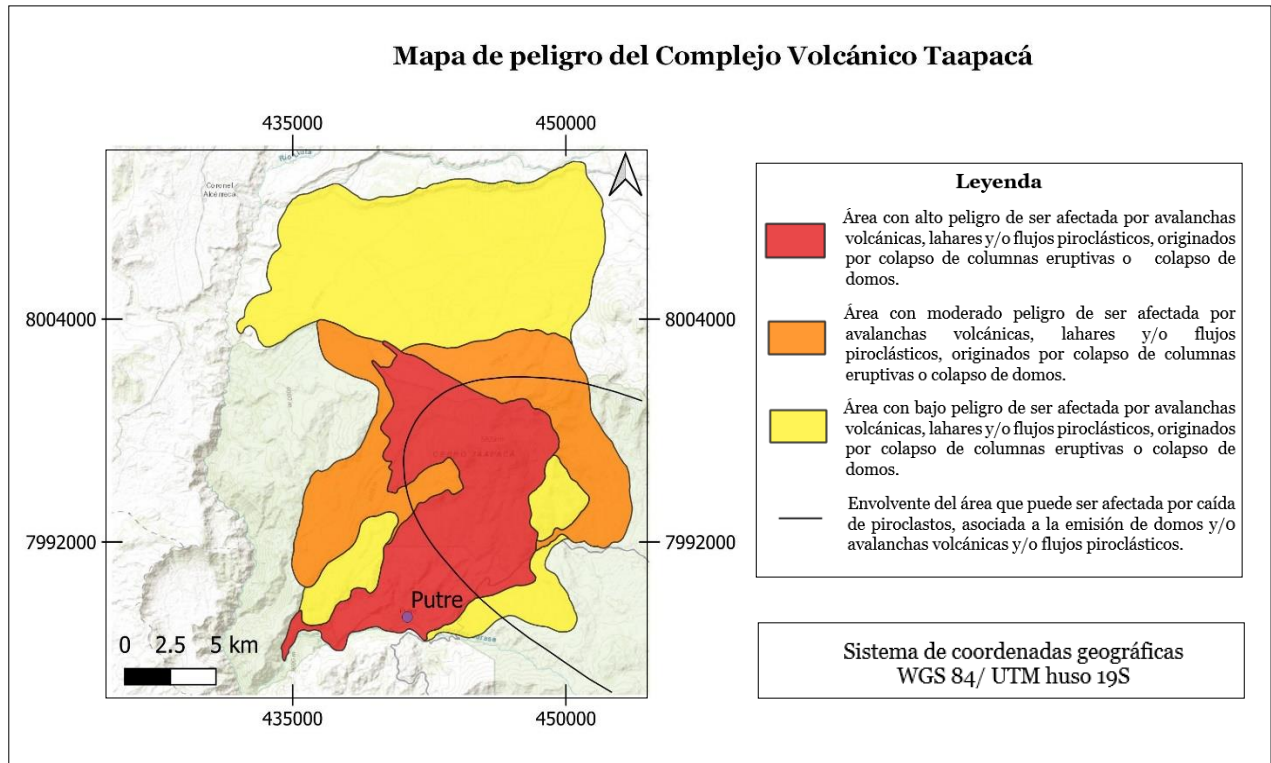


Figura 3.1. Mapa de peligro del complejo volcánico Taapacá. Modificado de Clavero (2007).

3.2. VOLCÁN SAN PEDRO

El volcán San Pedro (21°53'17" S; 68°23'26" W) corresponde a un estratovolcán de 6.145 m s.n.m. de altitud y de grandes dimensiones (ca. 150 km² de área y ca. 55 km³ de volumen), emplazado en el altiplano a 85 km al noreste de Calama, en la provincia de El Loa, región de Antofagasta (Bertin & Amigo, 2015; Bertin & Amigo, 2019), en el extremo occidental de una cadena volcánica de orientación este-oeste de 6 km de longitud, conformada también por el volcán San Pablo, considerado inactivo (SERNAGEOMIN, 2018). El volcán San Pedro ha permanecido activo desde fines del Pleistoceno inferior (<310 ka) con la edificación del volcán San Pablo, donde se emitieron numerosos flujos de lava, depósitos piroclásticos de flujo y un evento de colapso que generó un extenso depósito de avalancha de detritos volcánicos (Bertin & Amigo, 2015). La evolución del volcán ha estado controlada mediante la emisión de variados productos derivados de actividad efusiva, exhibiendo una transición bien definida entre lavas, lavas-domo y domos (Bertin & Amigo, 2019).

3.2. 1. Rocas del basamento e intrusivas

El volcán San Pedro se emplaza sobre un basamento constituido por, al menos, cuatro planicies ignimbríticas de distribución regional y pertenecientes al Mioceno superior (ignimbrita San Pedro, Sifón, Polapi y Carcote), secuencias volcánicas y volcanoclásticas del Mioceno superior y por una secuencia sedimentaria (Formación Opache). Sobre este basamento se desarrolló una profunda actividad volcánica que generó productos efusivos entre el Mioceno superior y el Pleistoceno superior, representada en la zona por los cerros del Azufre, Colorado, Huiche y Redondo, el volcán San Pablo y los domos de Chanka (Bertin & Amigo, 2019).

3.2. 2. Rocas y depósitos volcánicos

La geología del volcán San Pedro se ha organizado en 13 unidades estratigráficas, las cuales corresponden a fases eruptivas independientes y sucesivas. Estas unidades se han agrupado en dos etapas evolutivas principales y consecutivas, las que han sido denominadas Etapa San Pedro I y Etapa San Pedro II. Durante la primera etapa (Pleistoceno Medio, ca. >310-140 ka), se edificó el edificio volcánico ancestral de 6.145 m s.n.m., el cual representa alrededor del 65% del volumen total del volcán San Pedro, y donde la actividad volcánica está representada por la emisión de numerosas coladas de lava andesíticas y dacíticas, medianamente preservados y en su mayoría cubiertos por depósitos glaciares, aluviales, coluviales y escoriáceos de flujo. Mientras que durante la segunda etapa (Pleistoceno Medio-Holoceno, ca. <140 ka) se construyó el edificio volcánico moderno, de altitud 5.974 m s.n.m., donde el volcán retoma su actividad eruptiva a través de una

secuencia de lavas de bloques que da lugar a un conjunto de domos y lavas-domo, y al cono piroclástico La Poruña. Durante esta etapa se produjeron por lo menos siete erupciones explosivas de importancia que generaron flujos de detritos volcánicos y depósitos piroclásticos de caída, de bloques y ceniza (Bertin & Amigo, 2015; Bertin & Amigo, 2019).

3.2. 3. Historia eruptiva y peligros volcánicos

La actividad eruptiva histórica de carácter explosivo del volcán San Pedro incluye más de diez eventos desde la década de 1870, de VEI entre 1 y 2 (Anexo 9), pero en la actualidad el volcán exhibe actividad fumarólica de tipo pasiva (Bertin & Amigo, 2015).

Para el volcán San Pedro, el principal peligro derivado de una potencial actividad eruptiva tiene relación con el eventual emplazamiento y colapso de domos dacíticos, lo que podría producir flujos piroclásticos de bloques y ceniza con alcances cercanos a los 9 km. Un evento menos probable sería el caso de una erupción de tipo explosiva, la cual generaría caída piroclástica de distribución regional, así como flujos piroclásticos con alcances de hasta 14 km (Bertin & Amigo, 2019). Los productos volcánicos se integran en el mapa de peligro del volcán San Pedro (Figura 3.2.) y corresponden a lahares, flujos piroclásticos, lavas-domo y domos, eyección de piroclastos balísticos y piroclastos de caída (Bertin & Amigo, 2019). Estos últimos son representados por las envolventes del área con probabilidad anual de acumulación de, al menos, 10 cm de material piroclástico de caída.

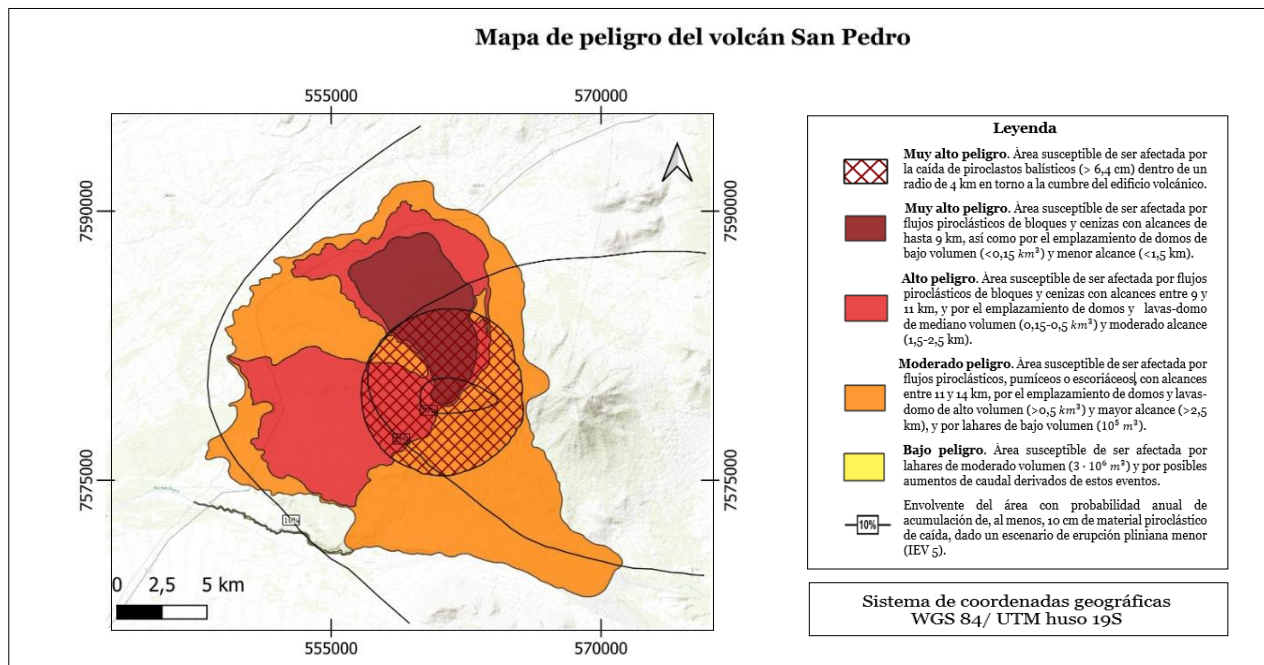


Figura 3.2. Mapa de peligro del volcán San Pedro. Modificado de Bertin & Amigo (2014).

3.3. VOLCÁN TUPUNGATITO

El volcán Tupungatito ($33^{\circ}23'S - 69^{\circ}50'O$) corresponde a un estratovolcán de 5.603 m s.n.m., corta vida (<80 ka) y reducido volumen (<30 km³) (Bertin *et al.*, 2013), ubicado a 55 km al este de la comuna San José de Maipo, en la provincia de Cordillera, región Metropolitana (SERNAGEOMIN, 2018). Este volcán se edificó principalmente mediante actividad efusiva, generando predominantes flujos de lava de composición andesítica a basalto andesítica (Hildreth & Moorbarth, 1988). Para luego cambiar a un estilo mixto efusivo-explosivo, donde se registra actividad freatomagmáticas y/o vulcanianas (Flores & Jara, 2018). En su sección superior exhibe ocho cráteres con grados de preservación variables, que se localizan en el extremo noroccidental de una depresión subcircular de 4 km de diámetro, interpretada como un anfiteatro de deslizamiento (Moreno *et al.*, 1988), o bien, como una caldera volcánica compuesta (González-Ferrán, 1995), que en su interior alberga al glaciar Tupungatito (Flores & Jara, 2018).

3.3. 1. Rocas del basamento e intrusivas

El volcán Tupungatito está construido sobre un basamento de sedimentos marinos y terrestres del Mesozoico, mediana a fuertemente plegados, y sobre parte de los productos eruptivos de edad pleistocena del volcán Tupungato (Farías, 2016). Bertin & Silva (2015) reconocen las siguientes secuencias: Rocas sedimentarias y volcano-sedimentarias de edad mesozoica, fuertemente afectadas por un complejo sistema de plegamientos y corrimientos, perteneciente al margen occidental de la Faja Plegada y Corrida del Aconcagua (Ramos *et al.*, 1991); rocas sedimentarias de edad miocena media, de origen sinorogénico, resultantes de la erosión y denudación progresiva de las unidades mesozoicas; secuencias volcánicas de edad pleistocena inferior a media, donde destaca el volcán Nevado Sin Nombre y secuencias volcánicas de edad pleistocena media a superior, caracterizadas por el volcán Tupungato.

3.3. 2. Rocas y depósitos volcánicos

Según Bertin & Silva (2015), los productos del volcán Tupungatito, caracterizados por productos de origen tanto efusivo como explosivo, consisten principalmente en secuencias de lavas, depósitos de flujo de detritos o flujos laháricos, depósitos de flujo piroclástico rico en escoria, depósitos de oleadas piroclásticas de nube acompañante, depósito de avalancha de detritos y depósitos de caída piroclástica.

3.3. 3. Historia eruptiva y peligros volcánicos

La actividad histórica registra una veintena de eventos desde el siglo XVII, los que incluyen reactivaciones menores e incrementos en la actividad fumarólica, que habrían sido de baja explosividad, caracterizados por no superar el VEI 2 (Anexo 9) y por la recurrencia de explosiones y columnas pequeñas de gas y tefra (Petit-Breuilh, 2004 en Farías, 2016). Su última erupción importante ocurrió entre los años 1958 y 1961, la cual generó una colada de lava de 1.5 km de longitud que fluyó hacia el noroeste (Flores & Jara, 2018), así como caída de tefra hacia Argentina (Bertin & Silva, 2015). Su última actividad ocurrió en 1986, con una débil columna de ceniza oscura que cubrió parte de los glaciares adyacentes. En la actualidad exhibe actividad fumarólica intensa y permanente, concentrada dentro de uno de los cráteres el cual, además, hospeda un lago ácido (SERNAGEOMIN, 2018).

El volcán Tupungatito corresponde a un centro de alta peligrosidad, cuya recurrencia de reactivación es de décadas. La zonificación integrada de los peligros proximales, que incluyen flujos de lava, de detritos, de piroclastos, lahares de mediano a largo alcance, y proyectiles balísticos; junto con las envolventes indicativas de la probabilidad anual de acumulación de material piroclástico de caída (Flores & Jara, 2018), se representa en el mapa de peligros del volcán Tupungatito (Figura 3.3.). Se considera que la dispersión de tefra debido a columnas eruptivas iguales o superiores a 15 km s.n.m. sería independiente de la época del año y fuertemente dirigida hacia territorio argentino (Bertin & Silva, 2015).

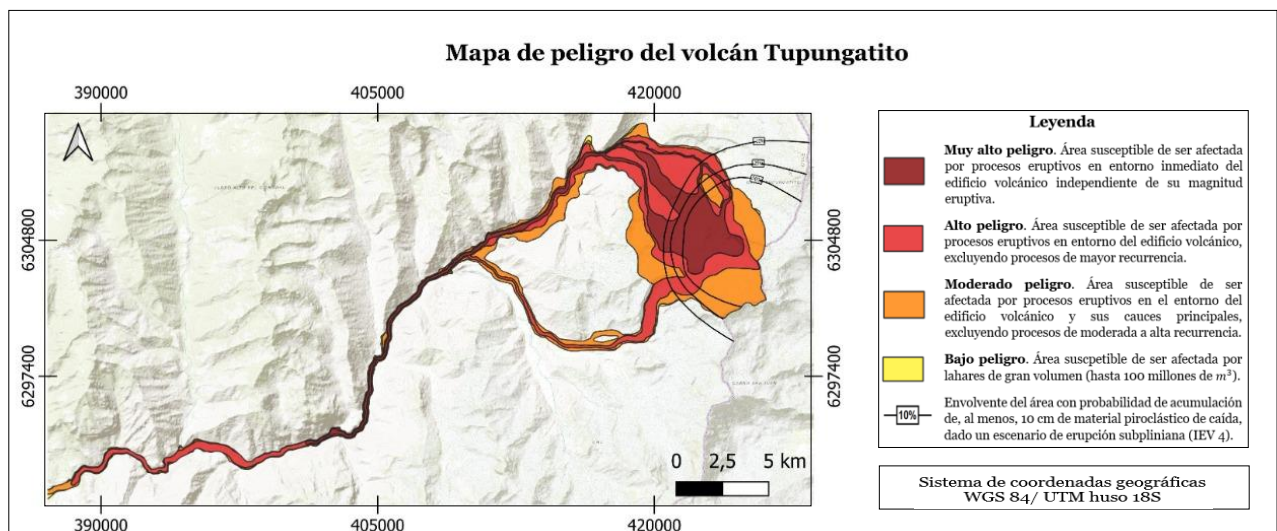


Figura 3.3. Mapa de peligro del volcán Tupungatito. Modificado de Flores & Jara (2018).

3.4. COMPLEJO VOLCÁNICO PLANCHÓN-PETEROA

El complejo volcánico Planchón-Peteroa ($35^{\circ}15'$ S y $70^{\circ}35'$ W) comprende un conjunto de dos estratovolcanes, cuya superficie oval abarca $78,5 \text{ km}^2$ y su cima alcanza los 4.107 m s.n.m. Este complejo está ubicado a unos 65 km al E-SE de la ciudad de Curicó, en la comuna Romeral, región del Maule (Naranjo *et al.*, 1999). Su historia eruptiva se inicia aproximadamente en el Pleistoceno Inferior ($<550 \text{ ka}$) (Hildreth *et al.*, 1984) con la formación del volcán Azufre, actualmente ubicado en el extremo sur del complejo. La actividad del volcán Planchón, ubicado 6 km al norte del volcán Azufre, comienza durante el Pleistoceno Medio-Superior, y comprende 25 km^3 de basaltos y basalto-andesita toleíticos a calco-alcalinos. El volcán Peteroa es el volcán más joven del complejo y el único que ha presentado actividad reciente (Tormey *et al.*, 1995 en Benavente, 2010). Se constituye entre los volcanes Azufre y Planchón, y comprende $<1 \text{ km}^3$ de lavas de composición andesíticas-basálticas a andesitas y unidades piroclásticas calco-alcalinas, como flujos piroclásticos basalto-andesíticos a dacíticos (Miranda, 2016) y tobas de composición riódacíticas de edad holocena (Tormey *et al.*, 1995).

3.4. 1. Rocas del basamento e intrusivas

El basamento del complejo volcánico Planchón-Peteroa, incluye franjas de orientación NNE de rocas sedimentarias, marinascontinentales y volcánicas del Jurásico Superior al Cretácico, las que están intruidas por 'stocks' granodioríticos terciarios. Las rocas más antiguas del basamento corresponden a sedimentitas marinas y evaporitas jurásicas (Formación Valle Grande), que afloran al este del complejo y consisten en un nivel inferior de areniscas, conglomerados y calizas fosilíferas, posteriormente descritas bajo el nombre de Formación Nacientes del Teno. El nivel superior está formado de lentes de yeso con intercalaciones de areniscas calcáreas (Formación Auquilco) de edad caloviana a oxfordiana superior. Concordantemente sobre la Formación Auquilco aflora una sucesión de areniscas y conglomerados con intercalaciones de volcanitas de edad kimmeridgiana, denominado como Formación Río Damas a las facies gruesas superiores, y Formación Tordillo a las facies más finas inferiores. Al norte del volcán Planchón aflora la Formación Colimapu, que consiste en sedimentitas con intercalaciones de tobas ignimbríticas, que han sido asignadas al Cretácico Inferior. La Formación Abanico, de edad terciaria inferior, está formada por una sucesión de lavas porfíricas y brechas andesíticas y rocas piroclásticas ignimbríticas. En las laderas del valle glaciar del río Claro afloran 'stocks' granodioríticos, tonalíticos y dioríticos que intruyen a la Formación Abanico y unidades más antiguas. Hacia el sur infrayacen discordantemente a lavas de la Formación Cola de Zorro, asignada al Terciario superior, y corresponden a secuencias de volcanitas no deformadas, constituidas por coladas de

andesitas máficas y rocas piroclásticas, principalmente tobas ignimbríticas de ceniza que constituyen extensos 'plateau' emplazados antes de la etapa de incisión vertical de profundos cañones glaciarios (Naranjo *et al.*, 1999).

3.4. 2. Rocas y depósitos volcánicos

El volcán Planchón exhibe estructuras distintivas que evidencian una larga evolución en etapas, que se han definido como las unidades Planchón 1, 2 y 3. A la primera de ellas se asocia un gran avalancha o flujo de detritos volcánicos, generado por el colapso gravitacional del flanco oeste del edificio, tras el cual se formaron las unidades 2 y 3, sucesivamente. El volcán Planchón 1 es una estructura volcánica semicónica de 3.977 m de altura, de composición basáltica y andesita basáltica, que exhibe un cráter abierto hacia el SW, que conforma un anfiteatro, de 3 km de diámetro, a partir de la cual se generaron depósitos de detritos volcánicos (Naranjo *et al.*, 1999). El volcán Planchón 2 corresponde a una estructura cónica de 1.200 m de altura, anidada al interior de la caldera generada por el colapso del Planchón 1, que comprende un volumen de 5 km³ de basaltos y basalto-andesitas muy similares a las del Planchón 1, pero están asociadas a mayores cantidades de depósitos piroclásticos (Tormey *et al.*, 1995; Naranjo, 2002 en Lemus, 2010). El volcán Planchón 3 constituye el volcán actualmente activo del complejo, desde donde se han emitido los productos de la secuencia volcánica más reciente. Según Naranjo *et al.* (1999), los depósitos vinculados a esta unidad corresponden a coladas de lava, conos de escoria, oleadas piroclásticas, flujos piroclásticos, depósitos de caída de bombas y lapilli de pómez y depósitos de ceniza.

3.4. 3. Historia eruptiva y peligros volcánicos

Este complejo se caracteriza por generar fumarolas y pequeñas explosiones ocasionales, aunque ha generado erupciones de pequeña a moderada magnitud que han afectado áreas relativamente cercanas. En el registro eruptivo (Anexo 9) se destacan erupciones de carácter freatomagmático (Naranjo *et al.*, 1999), de VEI ≤ 4 . (Petit-Breuilh, 2004; Smithsonian Institution).

De acuerdo a los estudios realizados en caso de reactivación del complejo Planchón-Peteroa, los procesos volcánicos potencialmente peligrosos que podrían ocurrir incluyen: caídas de tefra, flujos u oleadas de piroclásticos incandescentes, flujos de barro o lahares, flujos de lava, flujos de detritos, sismos volcánicos y emisión de gases (Naranjo *et al.*, 1999). Los flujos y oleadas piroclásticas parecen ser una amenaza poco probable en el complejo, no obstante, podrían afectar el sector oriental, al igual que las caídas de piroclastos. En tanto, la ocurrencia de lavas y lahares, constituyen un peligro en el sector occidental del centro eruptivo (Figura 3.4.).

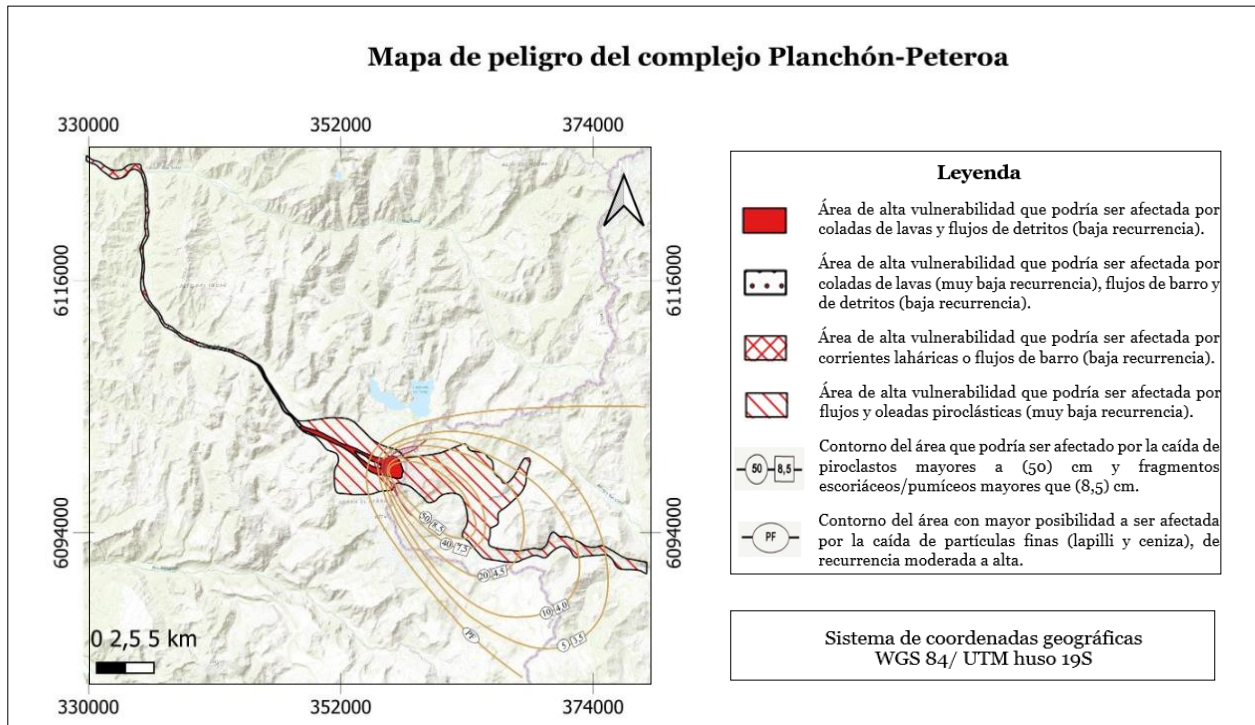


Figura 3.4. Mapa de peligro del complejo volcánico Planchón-Peteroa. Modificado de Naranjo *et al.* (1999).

3.5. COMPLEJO VOLCÁNICO CERRO AZUL-QUIZAPU

El complejo volcánico Cerro Azul-Quizapu ($35^{\circ}39,4'S - 70^{\circ}45,7'W$), pertenece al Grupo Volcánico Descabezados y se encuentra emplazado en el extremo meridional de este conjunto, en la comuna de San Clemente, provincia de Talca, región del Maule. Este complejo se compone de un estratovolcán andesítico, de 3788 m s.n.m, considerado inactivo, llamado Cerro Azul, y un cráter en su flanco norte denominado Quizapú (SERNAGEOMIN, 2018). El volcán Cerro Azul tiene una edad Holocena temprana a Pleistocena tardía, posee un volumen de 11 km^3 y se compone de flujos piroclásticos aglutinados y lavas con una composición variable entre basalto a riolita. El cráter Quizapu se originó en 1846 en una erupción efusiva que emitió 5 km^3 de lava, y cuyos productos eruptivos van desde basalto hasta riolita. Desde este cráter se ha concentrado la actividad eruptiva en los siglos XIX y XX, produciendo las dos erupciones históricas más voluminosas de América del Sur (Hildreth & Drake, 1992).

3.5. 1. Rocas del basamento e intrusivas

El basamento del complejo se encuentra formado por rocas cenozoicas de las Formaciones Abanico y Farellones, compuesta principalmente por rocas volcánicas y volcanoclásticas; y por las rocas más antiguas del sector, correspondiente a secuencias sedimentarias marinas-continentales

mesozoicas fuertemente deformadas (Lemus, 2010). En tanto que Wulff (2005, en Lemus, 2010), indica que este complejo se encuentra sobre un plató de lavas de una etapa temprana de la construcción de estos estratovolcanes, llamado el escudo Casitas. Drake (1976) identifica el plutón Invernada de 7 Ma (Mioceno tardío) como un cuerpo que presenta varias fases intrusivas que van desde una granodiorita de hornblenda hasta un granito de biotita. Se encuentra subyaciendo los volcanes Cerro Azul y Descabezado Grande, e intruyendo estratos volcánicos mesozoicos.

3.5. 2. Rocas y depósitos volcánicos

El volcanismo cuaternario está formado por material proveniente de erupciones volcánicas recientes del complejo Cerro Azul-Quizapu, y corresponde a depósitos piroclásticos, coladas de lava, depósitos de ceniza y depósitos de escoria. Drake (1976) distingue el vulcanismo del Pleistoceno tardío y del Holoceno (0,6-0 m.a.) en una amplia zona 20-30 km al este del Complejo, donde se reconocen depósitos de piedra pómez andesítica a riolítica diferenciada (Brüggen, 1950), flujos de andesitas basálticas que contienen olivino, domos de composición riolita-dacita y una secuencia de ignimbritas de riolita.

3.5. 3. Historia eruptiva y peligros volcánicos

El Quizapu se originó como consecuencia de la emisión de extensas coladas de lava dacítica en 1846. Posteriormente, desde 1907 mostró actividad explosiva del tipo freática a estromboliana menor e intermitente hasta 1932, año de la ocurrencia de una de las mayores erupciones históricas documentadas, que generó un extenso depósito piroclástico en Chile y Argentina (SERNAGEOMIN, 2018). Esta última erupción fue de tipo pliniana, emitió 4-5 km^3 de lava de composición dacítica (Drake, 1976), con un VEI de 5-6 (Petit-Breuilh, 2004).

La mayoría de las erupciones de este complejo han sido de carácter explosivo, dada la composición preferentemente silícea del magma. Es por esto que el mayor peligro lo constituye la lluvia de tefra que, dada la dirección de los vientos, tiende a afectar principalmente el sector oriente-nororiental del complejo, al igual que la eyección de piroclastos balísticos (Figura 3.5.). Los flujos piroclásticos y lavas están expuestos en quebradas tanto al W como al SE del cráter (Hildreth & Drake, 1992).

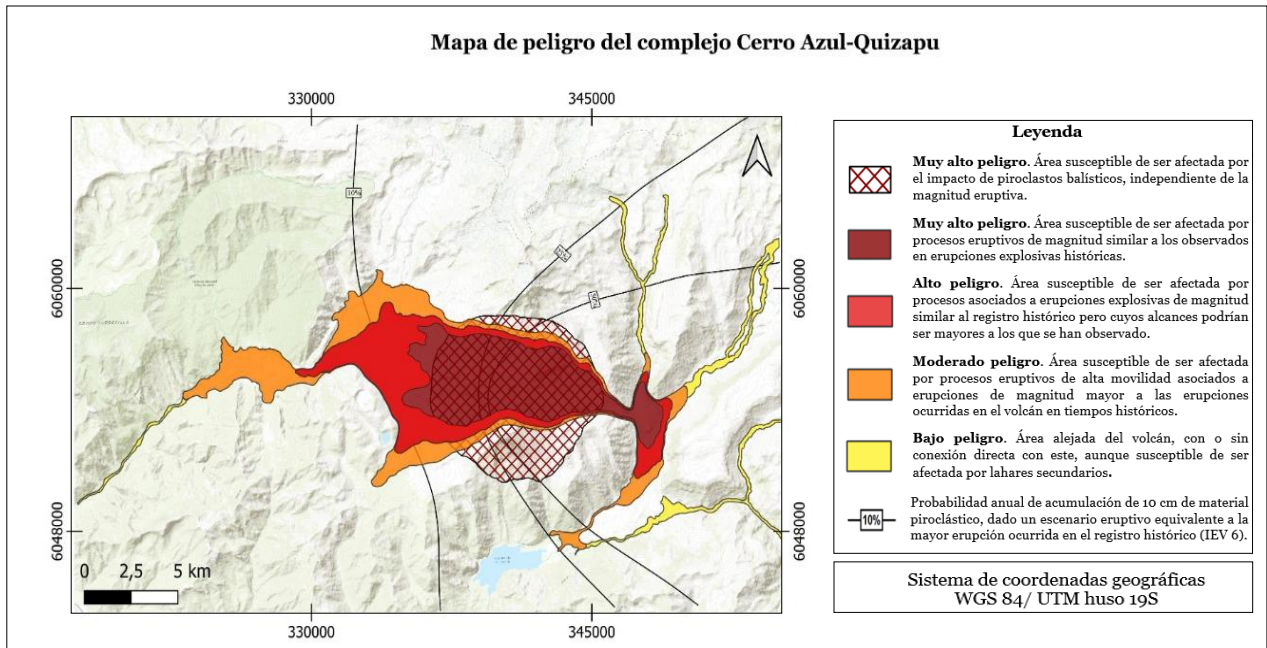


Figura 3.5. Mapa de peligro del complejo volcánico Cerro Azul-Quizapu. Modificado de Amigo & Bertin (2015).

3.6. COMPLEJO VOLCÁNICO QUETRUPILLÁN

El centro volcánico Quetrupillán ($39^{\circ}30'S - 71^{\circ}43'W$) corresponde a un complejo que alcanza una altura de 2360 m s.n.m. y se ubica a 18 km al SSW de Curarrehue, en el límite entre la IX región de la Araucanía y la XIV región de Los Ríos (Pavez & Moreno, 1994). Este complejo volcánico, de edad Pleistoceno Superior-Holoceno, está formado por un estratovolcán de cono truncado y varios centros de emisión independientes, inserto en una caldera volcánica de 3 km de diámetro (SERNAGEOMIN, 2018). Los productos emitidos cubren una superficie de 250 km^2 y su volumen total es de 90 km^3 (Moreno, 2017), cuyo rango composicional va desde basaltos a dacitas, en que escasean las composiciones intermedias. Este complejo volcánico se edificó en la intersección de dos zonas de fracturamiento cortical importantes: la cadena volcánica Villarrica-Lanín (NW-SE) y la Zona de Falla de Liquiñe- Ofqui (Pavez & Moreno, 1994).

3.6. 1. Rocas del basamento e intrusivas

Según Pavez & Moreno (1994), el complejo Quetrupillán está edificado sobre un basamento mesocenoico (Cretácico Superior y Mioceno Superior), constituido por cuerpos intrusivos formados por granitoídes gneissícos, granodioritas, dioritas, tonalitas, granitos rosados, stocks dacíticos y andesíticos. Además de secuencias volcánico-sedimentarias del Triásico al Mioceno,

las Formaciones Panguipulli, Curarrehue y Trapatrapa (Moreno *et al.*, 1994 en Simmons *et al.*, 2020). Se ha sugerido que este complejo se superpone a los restos erosionados de los estratovolcanes Quinquilil y Cordillera El Mocho, de carácter andesítico-basáltico a andesítico y probable edad Pleistoceno (Pavez, 1997).

3.6. 2. Rocas y depósitos volcánicos

En base a criterios morfoestructurales, Pavez & Moreno (1994), identifican cuatro unidades evolutivas distintas que cubren un período pre-última glaciación (Pleistoceno-Holoceno) hasta el reciente: Unidad Quetrupillán I, II, III y IV. La unidad Quetrupillán I se le asocia la formación de la caldera mayor de 7-8 km de diámetro, debido al colapso del edificio antiguo, que ocurrió durante la glaciación Llanquihue, y sobre la cual se construye el edificio actual (Brahm, 2017). Se compone de lavas dacíticas, tobas y brechas piroclásticas, depósitos de oleadas piroclásticas, de flujo de escorias con fiames, y depósitos ignimbríticos intracaldera. La unidad Quetrupillán II se compone de lavas andesíticas basálticas, andesítico silíceas y dacíticas, depósitos de flujos piroclásticos y de oleada. A la unidad Quetrupillán III se le asocia la formación de la caldera más reciente, donde se reconocen depósitos de flujo piroclástico escoriáceos de 13000 y 10000 años aproximadamente., lavas andesítico basálticas de tipo pahoe-hoe, domos y diques anulares de composición dacítica. La unidad Quetrupillán IV es uno de los depósitos más recientes, y corresponde a una de las últimas erupciones del complejo (<4000 años), está compuesta por conos de piroclastos, lava-domos, fisuras, lavas de tipo “aa” y de bloques, depósitos piroclásticos de flujo y caída, de composiciones andesítico-basáltica y dacítica (Pavez & Moreno, 1994).

3.6. 3. Historia eruptiva y peligros volcánicos

A fines del Pleistoceno Superior y en el Holoceno, este complejo ha tenido erupciones efusivas y explosivas con un VEI 2-4, de tipo estrombolianas, subplinianas y plinianas. Durante el Holoceno se han reconocido al menos nueve erupciones explosivas que han generado flujos piroclásticos y oleadas que han alcanzado el valle del Trancura. La erupción más explosiva y de tipo pliniana registrada en la historia holocena del volcán ocurrió hace 1.650 ± 70 años AP, de $VEI \geq 4$, que generó una columna eruptiva de 25 km de altura que tuvo dispersión hacia el este y noreste, y la emisión de oleadas y flujos piroclásticos (Moreno, 2017). Sin embargo, en el registro de Petit-Breuilh (2004) se destaca una erupción con una columna eruptiva de > 5.000 metros de altitud, de VEI 3 en 1872 (Anexo 9). Considerando la historia eruptiva de este volcán, es probable que un futuro evento eruptivo se caracterice por la emisión de coladas de lava, flujos piroclásticos, lahares y caída de piroclastos, tanto balísticos como por dispersión eólica, representadas en las envolventes del mapa de peligro del complejo Quetrupillán (Figura 3.6.).

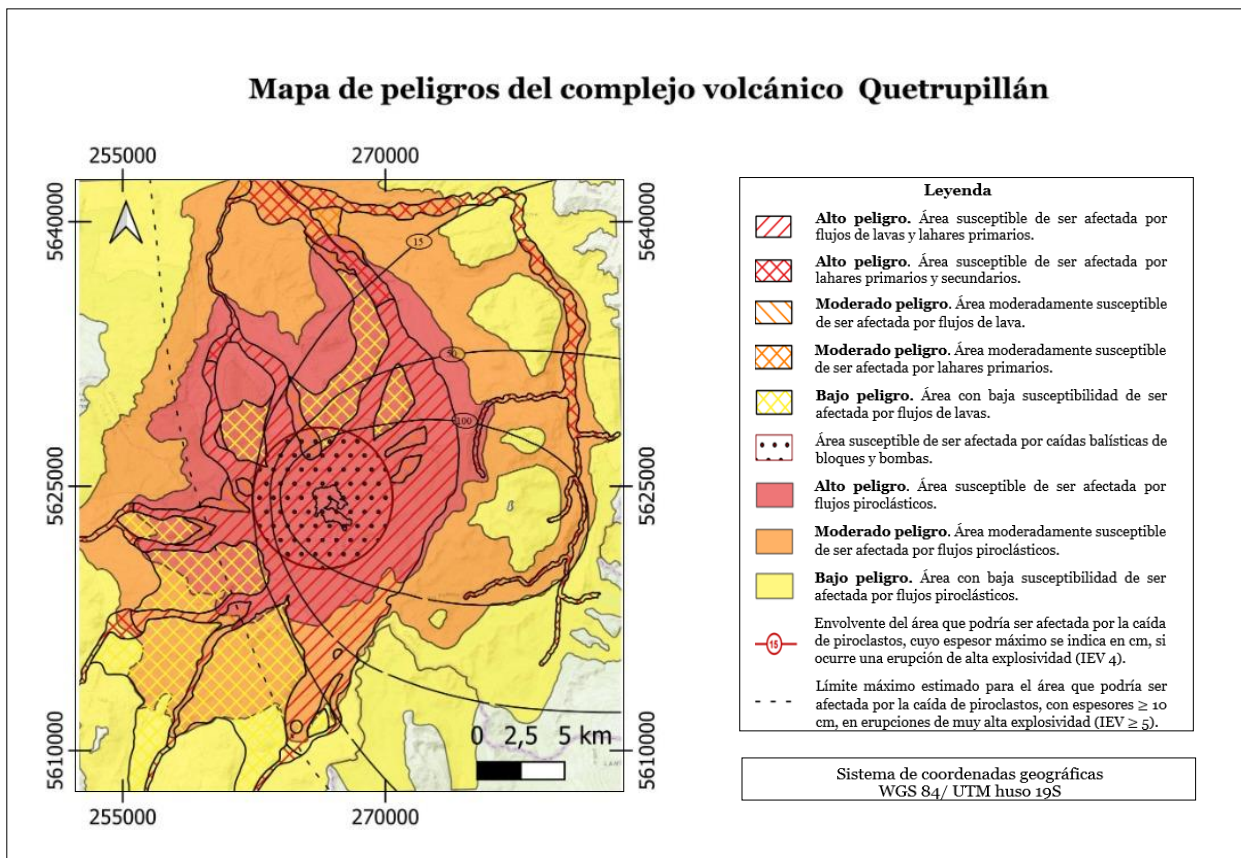


Figura 3.6. Mapa de peligro del complejo volcánico Quetrupillán. Modificado de Moreno (2017).

3.7. VOLCÁN OSORNO

El volcán Osorno ($41^{\circ}06'S - 72^{\circ}17'W$) es un estratovolcán compuesto del Pleistoceno Medio – Holoceno (ca. <200 ka). Se ubica a 45 km al NE de la ciudad de Puerto Varas y a 80 km de la ciudad de Osorno, en el límite de las provincias de Llanquihue y Osorno, en la región de Los Lagos. Su cima alcanza 2.661 m s.n.m, cubre un área de 250 km^2 y alcanza un volumen cercano a los 160 km^3 . El estilo eruptivo, predominantemente efusivo, está asociado a magmas de composición basáltica a andesítico-basáltica. Su actividad se caracteriza tanto por la ocurrencia de flujos piroclásticos basálticos y tefras de composición dacítica, como por la presencia de conos piroclásticos basálticos, domos dacíticos aislados y fisuras eruptivas que se organizan en cadenas NE-SW. Misma orientación de la cadena volcánica transversal que forma el volcán Osorno con los volcanes La Picada, Puntiaquedo y Cordón Cenizos (Moreno *et al.*, 2010).

3.7. 1. Rocas del basamento e intrusivas

Moreno *et al.* (2010) indican que el actual edificio volcánico se emplaza sobre un basamento cristalino, perteneciente al Batolito Norpatagónico, constituido por granitoides de edad Mioceno Inferior (ca. 18 Ma) y Cretácico Superior (ca. 70 Ma). Estos últimos corresponden a dioritas cuarcíferas y tonalitas de biotita y hornblenda. En tanto que los granitoides miocenos consisten en dioritas, tonalitas y granodioritas de hornblenda y biotita, que intruyen los granitoides cretácicos. En algunos sectores, las unidades volcánicas se apoyan sobre rocas volcánicas pleistocenas del volcán La Picada y en parte engranan con sus productos más recientes.

3.7. 2. Rocas y depósitos volcánicos

Sobre la base de criterios morfoestructurales, edades radiométricas y relaciones estratigráficas, Moreno *et al.* (2010) han definido cuatro unidades evolutivas en el edificio volcánico: Unidad Osorno 1,2,3 y 4. La Unidad Osorno 1 corresponde a un conjunto de lavas de composición basáltica y andesítico-basáltica con intercalaciones de depósitos laháricos, que se emplazaron durante la Glaciación Santa María, (260-132 ka) y fueron erosionadas durante la Glaciación Llanquihue (90-14 ka). Sobre esta estructura desmantelada se inició la construcción del volcán actual durante esta última glaciación, dando origen a la Unidad Osorno 2, que consiste en un conjunto de lavas de composición con predominio basáltico y andesítico-basáltico, excepcionalmente dacítico. La Unidad Osorno 3 constituyen parte importante del edificio volcánico actual y corresponde a un conjunto de lavas de composición andesítica y basáltica, y lahares posglaciales emplazados posteriormente a la Glaciación Llanquihue, pero previas a las erupciones explosivas del Holoceno medio (ca. 4 ka). La Unidad Osorno 4 representa la continuación de la actividad volcánica efusiva central en el Holoceno superior, y corresponde a un conjunto de lavas y depósitos piroclásticos, principalmente de composición basáltica y andesítico-basáltica.

3.7. 3. Historia eruptiva y peligros volcánicos

El volcán Osorno exhibe un estilo eruptivo predominantemente efusivo con amplio dominio de erupciones hawaianas a estrombolianas. Existe también, aunque de manera más restringida, evidencia de ciclos eruptivos estrombolianos, vulcanianos, e incluso subplinianos (Moreno, 1999a). El registro histórico señala erupciones importantes desde el cráter principal o fisuras de flanco desde 1575 hasta 1869, con un total de 17 erupciones documentadas (Anexo 9), con VEI de 1 a 3 (Petit-Breuilh, 2004). Su actividad eruptiva se mantiene hasta nuestros días, con erupciones desde el cráter central y a través de los múltiples conos y fisuras ubicados en sus flancos (SERNAGEOMIN, 2018).

Los principales peligros que pudieran estar vinculados a futuras erupciones del volcán Osorno corresponden a corrientes de lava, caídas de piroclastos, corrientes laháricas y/o crecidas. Por otra parte, es posible que las erupciones estén acompañadas, además, por emisión de gases tóxicos, actividad sísmica local, avalanchas de nieve y deslizamientos. La probabilidad de ocurrencia de flujos piroclásticos y avalanchas volcánicas es más remota, aunque no se puede descartar (Moreno *et al.*, 1985). Es probable que, en el futuro, tanto el volcán Osorno como sus cráteres adventicios, emitan coladas de lava de hasta 12 km de longitud, que afectarían, especialmente, al sector oriental, suroriental y suroccidental del volcán. Corrientes laháricas descenderían por los mismos cauces que los flujos de lava, aunque las precederían debido a su mayor velocidad (hasta 80 km/h) (Moreno, 1999a), exponiendo el sector septentrional de Ensenada y el sector occidental de Las Cascadas, donde alcanzan volúmenes de $80 \times 10^6 m^3$ en verano, y de $160 \times 10^6 m^3$ en invierno (Moreno *et al.*, 1985). La dispersión y caída de piroclastos es un proceso con capacidad de afectar a la región oriental del volcán, transportados por los vientos predominantes del oeste, como muestran las envolventes en el mapa de peligros del volcán Osorno (Figura 3.7.).

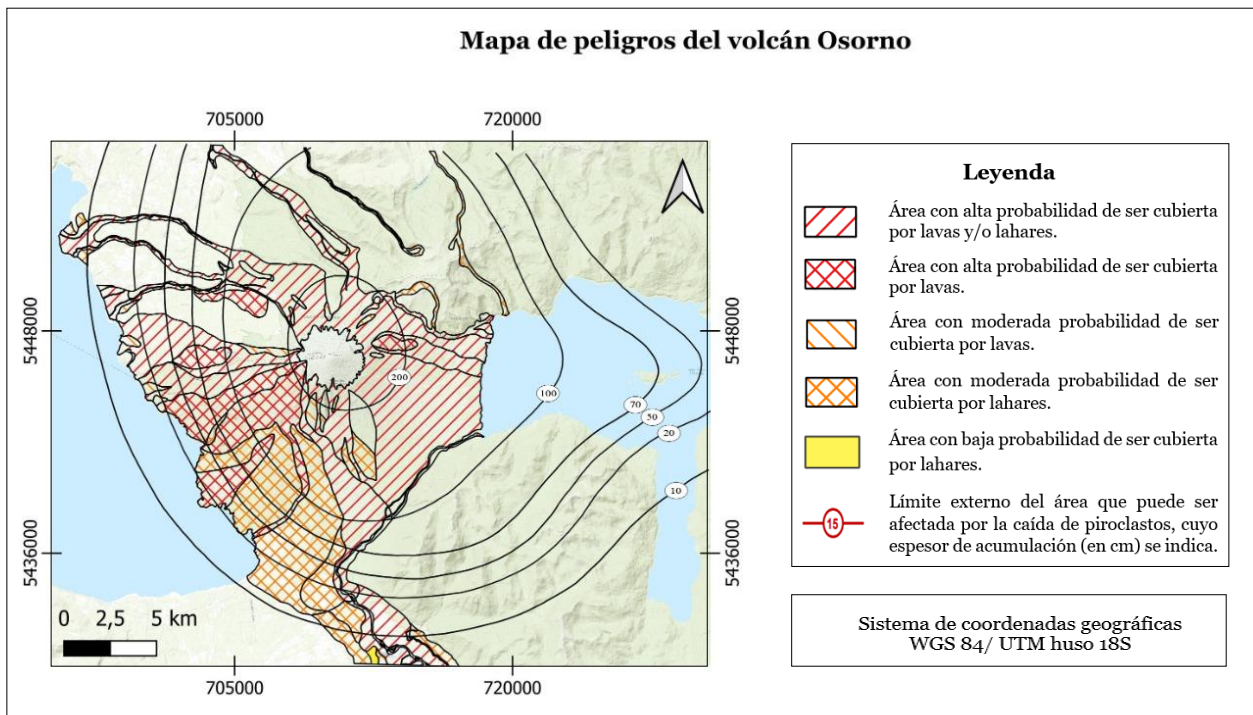


Figura 3.7. Mapa de peligro del volcán Osorno. Modificado de Moreno (1999a).

3.8. VOLCÁN CALBUCO

El volcán Calbuco ($41^{\circ}20'S$ y $72^{\circ}39'W$) corresponde a un estratovolcán del Pleistoceno Medio-Holoceno (< 300 ka). Se encuentra localizado a 30 km al este de la ciudad de Puerto Varas y a 32 km al noreste de la ciudad de Puerto Montt, en la provincia de Llanquihue, en la región de Los Lagos. El edificio volcánico se eleva 2.003 m s.n.m., cubre un área de ca. 180 km^2 y alcanza un volumen cercano a los 100- 120 km^3 . Presenta una morfología irregular de cono truncado por un episodio eruptivo freatomagmático explosivo que destruyó gran parte del edificio, dando origen a un cráter caldérico. Este volcán se ha construido a lo largo de tres ciclos glaciales-interglaciales (Sellés & Moreno, 2011) y sus productos están formados por coladas de bloques, alternando con depósitos de flujos piroclásticos (Petit-Breuilh & Moreno, 1997), de composición andesítica principalmente, y andesítico-basáltica (Sellés & Moreno, 2011).

3.8. 1. Rocas del basamento e intrusivas

El volcán Calbuco se emplaza sobre un basamento de rocas ígneas máficas y metasedimentarias del Paleozoico Superior (300-225 Ma), granitoides miocenos (ca. 25-12 Ma) y unas secuencias de rocas volcánicas y volcanoclásticas del Pleistoceno Inferior (ca. 1,4 Ma). Los plutones miocenos forman parte del Batolito Norpatagónico y corresponden a tonalitas, dioritas cuarcíferas y granodioritas, con gabros y dioritas subordinadas. En tanto que las rocas metamórficas y plutónicas del Paleozoico Superior, corresponden a ortogneises anfibólicos con biotita, gabros foliados, y esquistos cuarzo-pelíticos ricos en biotita. Finalmente, las secuencias pleistocenas (estratos de Hueñuhueñu) conforman remanentes estratificados que se superponen mediante discordancia de erosión a granitoides del Mioceno, ambos fuertemente afectados por erosión glacial (Sellés & Moreno, 2011).

3.8. 2. Rocas y depósitos volcánicos

Sobre la base de la evolución morfológica del cono volcánico, Sellés & Moreno (2011) definen cuatro unidades de actividad volcánica: Unidad Calbuco 1, 2, 3 y 4. La Unidad Calbuco 1 (Pleistoceno Medio a Superior) se compone de un conjunto de coladas de lava de composición principalmente andesítico-basálticas, con intercalaciones volcanoclásticas (ca. 340-110 ka) que sobreyacen mediante discordancia erosiva al basamento plutónico y metamórfico, y a los Estratos de Hueñuhueñu. La Unidad Calbuco 2 (Pleistoceno Superior) está constituida por coladas de lava gruesas de composición andesíticas (ca. 110-14,5 ka), además de potentes intercalaciones de brechas piroclásticas y brechas de origen lahárico, formando gran parte de la fracción superior del volcán. La Unidad Calbuco 3 (Pleistoceno Superior Tardío-Holoceno) está compuesta por coladas

de lava predominantemente andesíticas, rocas piroclásticas y brechas de origen lahárico intercaladas, que forman el cono moderno del volcán (ca. <14 ka - >1893 AD), flujos piroclásticos y lahares con intercalaciones de gravas, arenas volcánicas y cenizas, coronada por la ignimbrita Alerce (ca. 13,5-6,5 ka), depósitos de pómez, escoria y/o ceniza (ca. 9- <1 ka), abanicos de lahares calientes y fríos, y flujos piroclásticos de bloques y ceniza (ca. 4- <1 ka). Finalmente, la Unidad Calbuco 4 (Holoceno) se compone de lavas que conforman un domo al interior del antiguo cráter central, formadas a partir de la erupción de 1893, además de flujos de lahares fríos y caliente (ca. 1700 AD?-1961 AD), generados durante las erupciones de 1917, 1929 y 1961.

3.8. 3. Historia eruptiva y peligros volcánicos

La actividad histórica documentada incluye a lo menos 15 ciclos eruptivos (Anexo 9), que revelan un comportamiento de tipo explosivo, con erupciones freatomagmáticas, vulcanianas, subplinianas y freatoplínicas débiles, con generación de sucesivos domos, lavas de bloques, columnas de gases y piroclastos de hasta 20km de altura, flujos y oleadas piroclásticos, y lahares calientes. Lo cual ha permitido clasificar estas erupciones con un índice de explosividad entre 2 a 4 (Petit-Breuilh, 2004; Moreno, 1998).

Los procesos volcánicos peligrosos, durante futuros eventos eruptivos, consisten en caídas de piroclastos, corrientes de lava y laháricas, flujos de piroclastos y deslizamientos del domo, acompañados por explosiones laterales, emisión de gases tóxicos, actividad sísmica local y deslizamiento de tierra. Aunque la probabilidad de ocurrencia de flujos piroclásticos mayores sea baja, este es un fenómeno que no se debe descartar. Las coladas de lavas originadas durante futuras erupciones escurrirían, preferentemente, por los cauces del flanco noreste y sudeste del volcán, por el río Blanco-Correntoso, y no sobrepasarían los 9 km de longitud (Moreno, 1999b). Los lahares descenderían por los mismos cauces de las lavas: hacia el sur, por los valles de los ríos Correntoso-Blanco, Colorado y Este, donde se ubica el abanico Correntoso; y hacia el norte, por el río Blanco, donde se ubica el abanico Ensenada (Sellés & Moreno, 2011). En la zona del río Colorado (sur), las erupciones que ocurran en febrero podrían provocar lahares con volúmenes de hasta $3 \times 10^6 m^3$ y en septiembre de hasta $28 \times 10^6 m^3$. Los flujos piroclásticos han afectado, especialmente, el sector oriental del volcán, donde volúmenes superiores a $1 km^3$ han dejado depósitos en Ralún, donde presentan espesores de hasta 70 cm. Las caídas de piroclastos de tamaño ceniza y lapilli podrían generar columnas eruptivas de 17 km con dispersión al NE, como las registradas en la erupción del 2015 (Segura *et al.*, 2015), que afectará principalmente el sector oriental del volcán, donde se ubican los distritos de Ensenada y Ralún (Figura 3.8.). Además,

bombas pumíceas de 10 cm de diámetro podrían formar mantos de hasta 40 cm de espesor en Ralún (Moreno, 1999b).

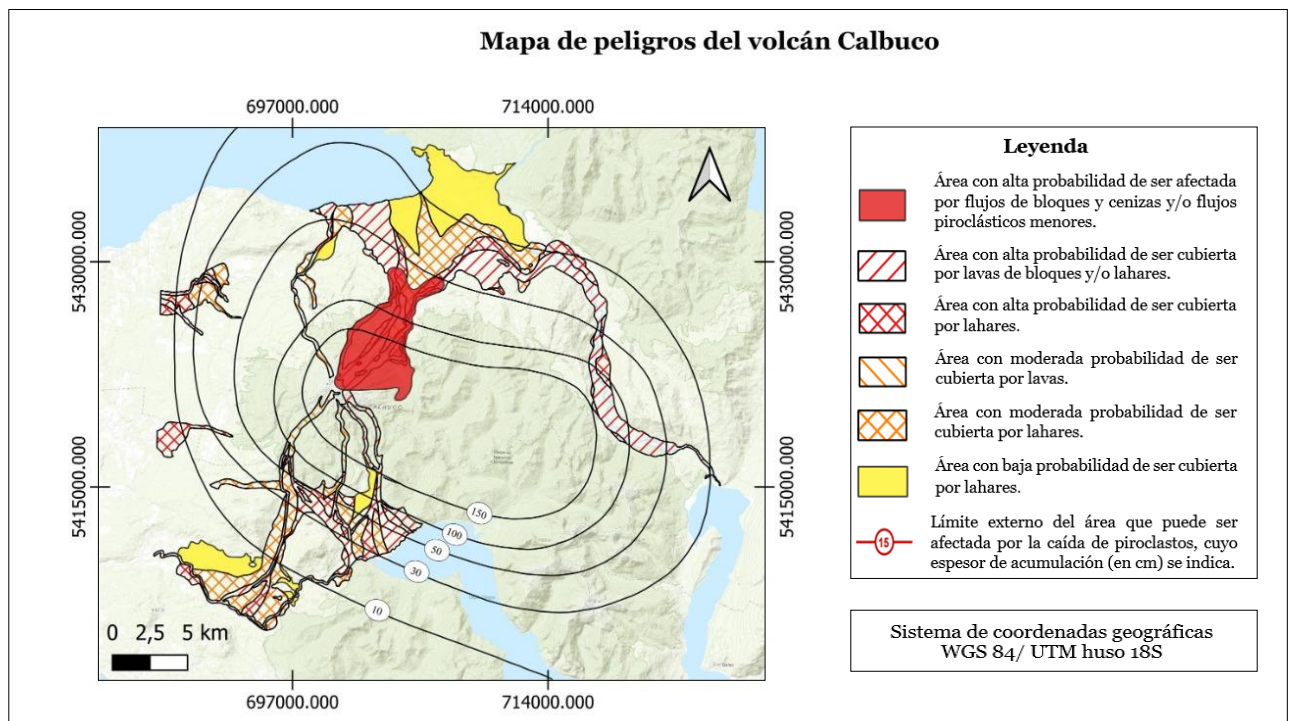


Figura 3.8. Mapa de peligro del volcán Calbuco. Modificado de Moreno (1999b).

3.9. VOLCÁN CHAITÉN

El volcán Chaitén ($42^{\circ}50,2'S - 72^{\circ}39,1'W$, 950 m s.n.m.) corresponde a un complejo de domos riolíticos dentro de una caldera de colapso, que se sitúa 10 km al NE del poblado homónimo en la Provincia de Palena, región de Los Lagos. La caldera (ca. 9,4 ka), de 3 km de diámetro, está conformada por una secuencia preglacial de lavas y brechas, y se formó durante una erupción ocurrida hace 9.400 años (SERNAGEOMIN). Sus laderas están formadas por una secuencia volcánica estratificada de composición basáltica a andesítica de edad pleistocena, de más de 400 m de potencia, erosionada por la acción de glaciares. Alrededor del volcán Chaitén se observan depósitos cuaternarios volcanogénicos, principalmente de piroclastos, de caída y depósitos laháricos (SERNAGEOMIN-BRGM, 1995).

3.9. 1. Rocas del basamento e intrusivas

El volcán Chaitén sobreyace a un basamento compuesto principalmente por granitoides Miocenos, constituyentes del Batolito Norpatagónico (Pankhurst *et al.*, 1992), rocas metamórficas de grado

bajo y medio (metareniscas y micaesquistos), y gneises micáceos de edad Paleozoico Superior (SERNAGEOMIN-BRGM, 1995).

3.9. 2. Rocas y depósitos volcánicos

Con base en un reconocimiento geológico y fotogeológico, SERNAGEOMIN-BGRM (1995) ha definido dos unidades volcánicas: una secuencia pre-caldera volcano-sedimentaria Pleistocena, compuesta de conglomerados con clastos andesíticos y de granitoides, depositados en forma caótica en ambientes marinos de poca profundidad (Piña-Gauthier & Vega, 2010), y un domo riolítico post-caldera (> 5.6 ka).

Además, Moreno (1996 en Muñoz, 2019) define unidades volcánicas cuaternarias de diferente edad relativa: depósitos de flujo piroclásticos (ignimbritas) y depósitos coluviales del Holoceno; flujos de lava basáltica y conos piroclásticos recientes, en las que podría incluirse algunas emisiones históricas (Post glacial; Holoceno < 0,01 Ma). Además de flujos de lavas, domos y estratovolcanes muy erosionados por la acción glacial (Pleistoceno Superior ~ 0,1 Ma), que se asocia a secuencias de lavas andesíticas.

3.9. 3. Historia eruptiva y peligros volcánicos

La actividad eruptiva del volcán Chaitén en los últimos 10.000 años incluye importantes eventos explosivos de gran magnitud (SERNAGEOMIN). El último ciclo eruptivo ocurrió durante los años 2008-2009 (Anexo 9), generando una de las mayores erupciones globales desde la década de 1990. La erupción consistió en una fase explosiva, con una erupción pliniana a subpliniana de aproximadamente dos semanas de duración que evacuó 4 km³ de magma riolítico (Lara, 2009) y generó un volumen de 1 km³ de tefra (Watt *et al.*, 2009); seguida por una fase efusiva de aproximadamente 20 meses de duración que evacuó alrededor de 0,8 km³ de lava riolítica de alto contenido de sílice, lo que formó un domo dentro de la caldera del volcán (Major & Lara, 2013). Los colapsos parciales del nuevo domo, provocaron múltiples flujos piroclásticos de pequeño volumen que recorrieron una distancia de 2 km hacia el norte y noreste del volcán, interrumpiendo la Ruta 7. Además, estos colapsos generaron corrientes de densidad piroclástica que ingresaron al valle del río Chaitén al sur del volcán, recorriendo 6 km y llegando a 3 km del pueblo de Chaitén (Major *et al.*, 2013).

Dado el registro eruptivo del volcán, las principales amenazas que puede presentar este volcán son la gran cantidad de ceniza emitida y el colapso de la columna eruptiva y/o domos. Como se muestra en la Figura 3.9., el poblado de Chaitén está expuesto tanto al efecto de lahares como de flujos y oleadas piroclásticas, e inundaciones que suelen afectar primordialmente el cauce del río Blanco

en cuya desembocadura se encuentra la zona urbana (Lara & Calderón, 2015), y donde el sedimento transportado puede embancarse formando deltas de cenizas en la bahía de Chaitén (SERNAGEOMIN, 2009; informe técnico 9 en Valenzuela, 2011), como ocurrió en la erupción de 2008.

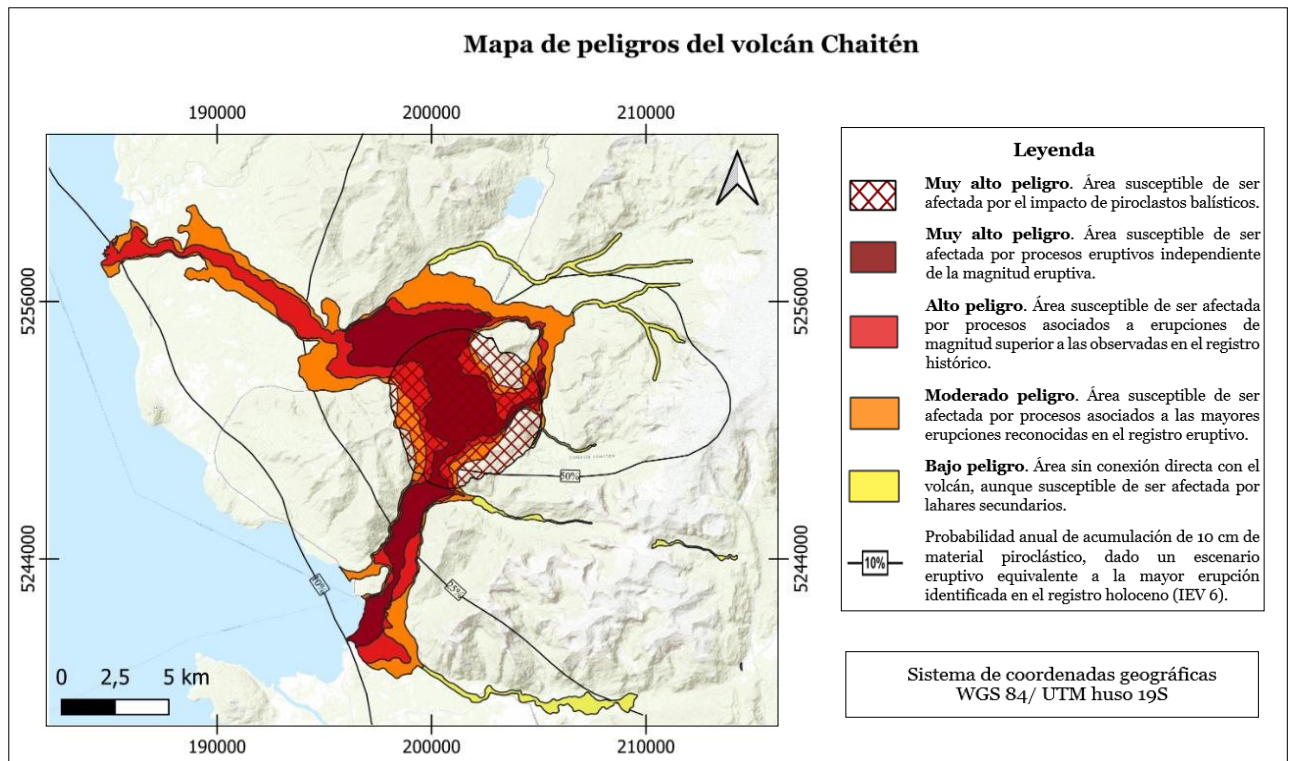


Figura 3.9. Mapa de peligro del volcán Chaitén. Modificado de Amigo *et al.* (2015).

3.10. VOLCÁN HUDSON

El volcán Hudson ($45^{\circ}55'S - 72^{\circ}58'W$) es un complejo volcánico del Pleistoceno Tardío (1 Ma). Se ubica a 80 km al oeste de Coyhaique y 60 km al suroeste de Puerto Aysén, en la región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo (Amigo & Bertin, 2014). Este centro eruptivo de 1.905 m s.n.m., cubre un área aproximada de 300 km^2 y posee una extensa caldera casi circular de unos 10 km de diámetro, donde se aloja un glaciar cuyo volumen sobrepasa los $2,5 \text{ km}^3$ (Naranjo, 1991; Naranjo & Stern, 1998). La caldera fue formada por múltiples eventos de colapso volcánico-tectónico en tiempos relativamente recientes (Orihashi *et al.*, 2004). El volcán Hudson está principalmente formado por coladas de lava y depósitos piroclásticos de composiciones que varían desde andesíticas-basálticas a dacíticas (Amigo & Bertin, 2014). Este volcán es parte de un conjunto de centros monogenéticos, formados de escoria, lapilli y flujos de lava, ubicados sobre

una falla transversal del tipo de cizalla ligada estructuralmente a la Zona de Falla Liquiñe Ofqui (Gutiérrez *et al.*, 2005).

3.10. 1. Rocas del basamento e intrusivas

Este edificio volcánico se emplaza sobre rocas plutónicas mesozoicas pertenecientes al Batolito Norpatagónico (Pankhurst *et al.*, 1999), de edad Cretácico inferior y composición granítica (Bertin, 2014). Según Orihashi *et al.* (2004) están compuestas por diorita de hornblenda a monzogranitos. En tanto que Gutiérrez *et al.* (2005) afirma que corresponden a monzodiorita de biotita y anfíbol. Por su parte, Pankhurst *et al.* (1994) identifican una zonificación del batolito: en el sector más oriental, el cuerpo intrusivo muestra una composición cuasi-homogénea de leucomonzonita, mientras que hacia el oeste tiene composición de diorita-tonalita y granodiorita.

3.10. 2. Rocas y depósitos volcánicos

En los flancos externos de la caldera (NE y SE) se observan afloramientos de secuencias volcánicas (Gutiérrez *et al.*, 2005). El sector norte del volcán muestra flujos de lavas intercalados con capas de ignimbritas de composición basáltica a andesítica, junto con intrusiones dacíticas y flujos de lava (Orihashi *et al.*, 2004). Los flujos laháricos se ubican principalmente en los flancos norte y sur de la caldera, y están constituidos de clastos poligenéticos, generalmente de lavas máficas y de bloques intrusivos menores. La mayoría de los materiales que se ubican fuera del borde de la caldera son gruesos depósitos de lahares, flujos de lavas subordinadas y depósitos piroclásticos. Brechas de hialoclastita se encuentran principalmente en el sector S-SE del volcán (Gutiérrez *et al.*, 2005).

3.10. 3. Historia eruptiva y peligros volcánicos

Durante el Holoceno, la actividad del volcán Hudson ha estado caracterizada por erupciones explosivas, entre las que se reconoce uno de los mayores eventos ocurridos en los Andes en tiempos históricos: la erupción pliniana freato-magmática de 1991 (Naranjo, 1991), que alcanzó un VEI 4 (Petit-Breuilh, 2004; Smithsonian Institution), afectando gran parte del sur de Chile y Argentina (Amigo & Bertin, 2014). Hasta la fecha, el volcán Hudson se ha mantenido en niveles estables de actividad (Perales, 2020).

Asociado a los distintos eventos eruptivos (Anexo 9), se han identificado potentes depósitos derivados de flujos piroclásticos hacia el N, SE y SO del volcán, y lavas posglaciales hacia el NO, cuya extensión alcanza alrededor de 5 km (Amigo & Bertin, 2014). Se han reportado lahares encauzados principalmente hacia el oeste y noroeste, a lo largo del río Huemules, los que han ocasionado víctimas fatales y cuantiosos daños al entorno. Además, la caída de material

piroclástico en forma de pómez y ceniza, ha afectado regiones ubicadas principalmente al sureste del volcán, donde las tefras eyectadas cubren más de 150.000 km^2 en Chile y Argentina, provocando grandes daños al medio ambiente y a la economía de ambos países (Wilson *et al.*, 2011). Es por esto que el mayor peligro lo constituye la lluvia de tefra a distancia, representada en la Figura 3.10. mediante envolventes de las áreas con determinada probabilidad de acumulación de 10 cm de tefra frente a un escenario eruptivo equivalente a la erupción de 1991.

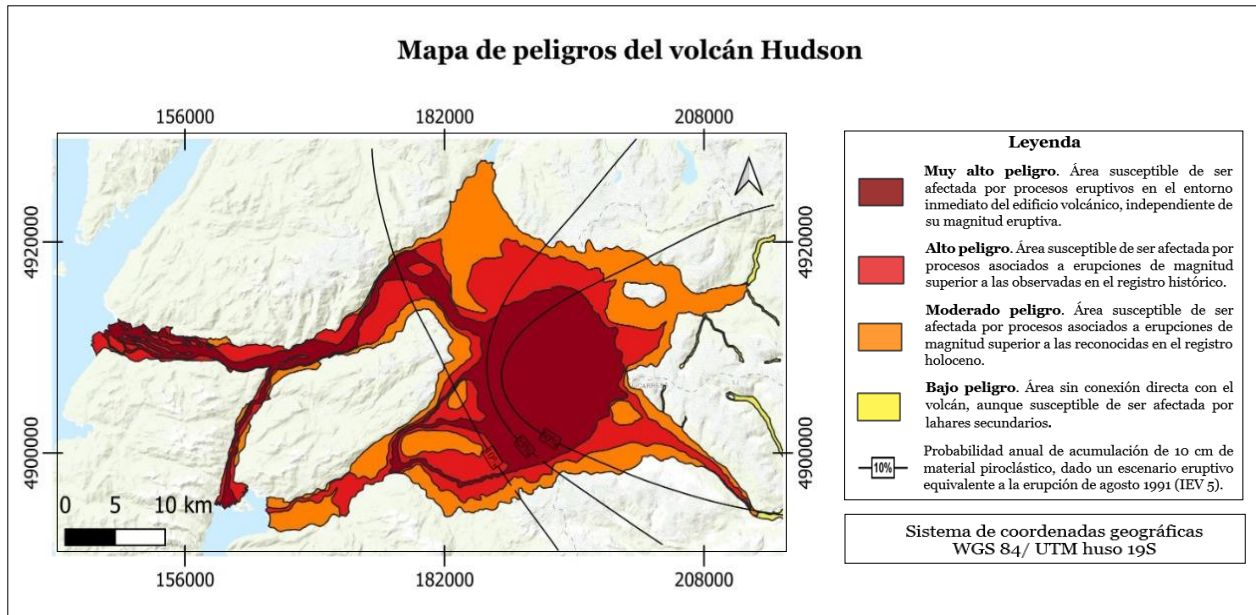


Figura 3.10. Mapa de peligro del volcán Hudson. Modificado de Amigo & Bertin (2014).

4. METODOLOGÍA

El procedimiento utilizado para la ejecución de la evaluación de amenaza volcánica, está inspirado en la metodología desarrollada por NVEWS, que consiste en una evaluación sistemática de 15 indicadores de peligro y 10 factores de exposición que United States Geological Survey (USGS) elaboró para calcular una puntuación de amenaza para cada volcán de EE. UU, con el fin de tener una base objetiva y consistente para priorizar un sistema de alerta temprana a escala nacional (Ewert *et al.*, 2005). La formulación de esta nueva metodología, realizada por Hidalgo (2023), constituye un análisis detallado de la distribución espacial del peligro y la exposición de personas, viviendas e infraestructuras críticas, mediante herramientas SIG. La integración de esta, con los peligros intrínsecos de cada volcán, representados en los mapas de peligro del SERNAGEOMIN, permiten evaluar y comparar el valor de la amenaza volcánica entregando resultados semicuantitativos, objetivos y más precisos.

La evaluación de amenaza se realizó en los 26 sistemas volcánicos de mayor riesgo específico de Chile, según SERNAGEOMIN (2019). Con el objetivo de identificar, aquellos centros eruptivos que representan el mayor peligro potencial, a fin de que luego se puedan centrar en ellos los esfuerzos para la reducción del riesgo de desastres. Sin embargo, para efectos de este trabajo, se evaluaron los sistemas volcánicos: Taapacá, San Pedro, Planchón-Peteroa, Tupungatito, Cerro Azul- Quizapu, Quetrupillán, Osorno, Calbuco, Chaitén y Hudson.

4.1. ANÁLISIS DE EXPOSICIÓN

Si bien, las erupciones volcánicas constituyen fenómenos propios de la naturaleza, de igual forma generan consecuencias ambientales, económicas, climáticas, humanas, locales e internacionales. Sus riesgos afectan la estabilidad en la vida de las personas, golpeando principalmente a nivel económico y de salud. Sin embargo, durante las erupciones también se ven afectadas las infraestructuras públicas, ya que la caída de cenizas sobre techos o cubiertas puede causar daños o colapso de estructuras o edificaciones, destrucción de caminos y vías de acceso, comprometiendo los servicios básicos (agua, electricidad, transporte, comunicaciones) y el acceso a los servicios de salud.

Con el objetivo de evaluar el peligro volcánico al que están expuesta la población urbana y rural, infraestructuras críticas (establecimientos educacionales, centros de salud, municipios, bomberos, carabineros y centrales hidroeléctricas) y las principales vías de transporte, se construyó una Base de Datos Espacial (BDE), con información referente a la distribución y

ubicación de los posibles elementos expuestos. Esta fue obtenida de los repositorios del Instituto Nacional de Estadísticas (INE), Infraestructuras de Datos Geospaciales (IDE), dependiente del Ministerio de Bienes Nacionales, complementados con datos de la Comisión Nacional de Energía (CNE) y la Biblioteca del Congreso Nacional (BCN).

4.1. 1. Procesamiento de datos

Para el levantamiento del censo del año 2017, la división geográfica censal del Instituto Nacional de Estadísticas o INE (2018), divide el territorio comunal en distritos censales, los que pueden ser urbanos, rurales o mixtos. A su vez, en el área urbana se reconocen zonas que se componen de ‘manzanas’, y en el área rural, localidades que se componen de ‘entidades’, las que también pueden dividirse en: aldeas, caseríos, asentamientos, fundos, parcelas, etc., como se puede observar en la Figura 4.1.

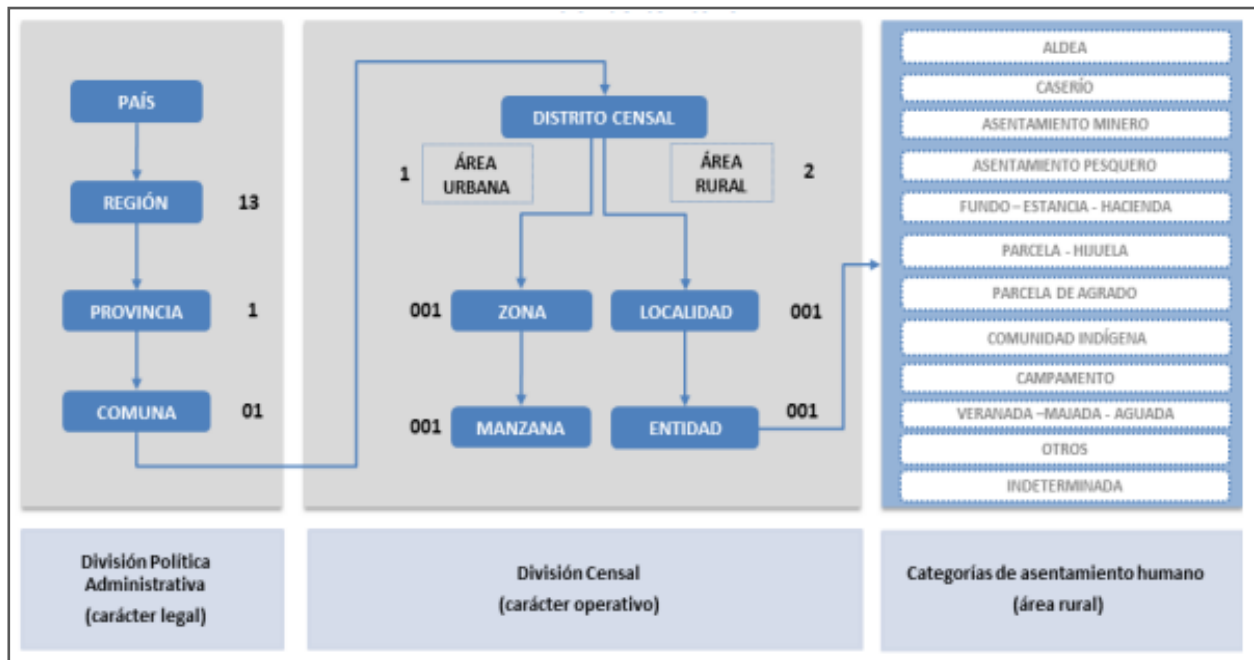


Figura 4.1. División del territorio realizada para el censo del 2017. Extraída del INE (2018).

Las entidades censales constituyen geometrías referenciales, representadas por polígonos vectoriales (*shapefile*), que contienen información referente a la cantidad de personas y viviendas que se encuentran en cada una de ellas, entre otros datos cualitativos.

Las entidades urbanas o ‘manzanas’ corresponden a asentamientos humanos con continuidad y concentración de construcciones en un amanzanamiento regular con población mayor a 2.000 habitantes, o entre 1.001 y 2.000 habitantes, donde menos del 50% de la población que declara

haber trabajado se dedica a actividades primarias. Por lo que, para este estudio, se consideró que estas entidades representan bien la distribución de la población y viviendas ubicadas en ellas.

Por el contrario, las entidades rurales cubren superficies más extensas, presentando una mayor dispersión de datos, por lo que no representan de forma tan precisa la ubicación de las personas y viviendas dentro de ellas. Además, las entidades son generadas de forma automática mediante *software*, por lo que no coinciden necesariamente con elementos geográficos reconocibles (INE, 2018). Es por esto que se llevó a cabo un análisis de distribución de construcciones (zonas edificadas), para definir las entidades donde efectivamente se localiza la población.

4.1.1.1. Análisis de zonas edificadas en área rural

Para determinar la ubicación de las viviendas se utilizan imágenes satelitales de *Google Satellite*, proporcionada por *Quick Map Services* (QMS), una herramienta del *software* QGIS 3.24. El objetivo es analizar el terreno de interés para identificar y delimitar zonas donde existan construcciones rurales.

El primer paso es definir la extensión mínima del territorio a analizar, reconociendo las entidades censales expuestas a los peligros volcánicos, por medio de la superposición de los mapas de peligro con la capa de entidades rurales, las cuales se denominan entidades censales modificadas (ECM).

Posteriormente, la selección de construcciones se realiza mediante un criterio de puntos (Figura 4.2.), que consiste en una cuadrícula o grilla uniforme con separación de 70 m, y un *buffer* o capa auxiliar redonda de 50 m de radio a partir de cada punto de la cuadrícula. Si dentro del *buffer* existe al menos una construcción asociada a un punto de la grilla, este punto se considera parte del área construida. Si una construcción está dentro del área formada por la intersección de dos *buffers*, y uno de ellos no contiene más construcciones, se seleccionará el punto cuyo radio de influencia contenga construcciones adicionales. De no cumplirse este último requisito en ninguna de las dos circunferencias, se selecciona el punto más próximo a la edificación observada.

Estos puntos seleccionados dan origen a una nueva capa o *shapefile*, que delimitan el área residencial dentro de las entidades rurales, por medio de un *buffer* cuadrado de 50 m de radio a partir de cada punto (Figura 4.3.), los que finalmente representarán el área rural construida (ARC).

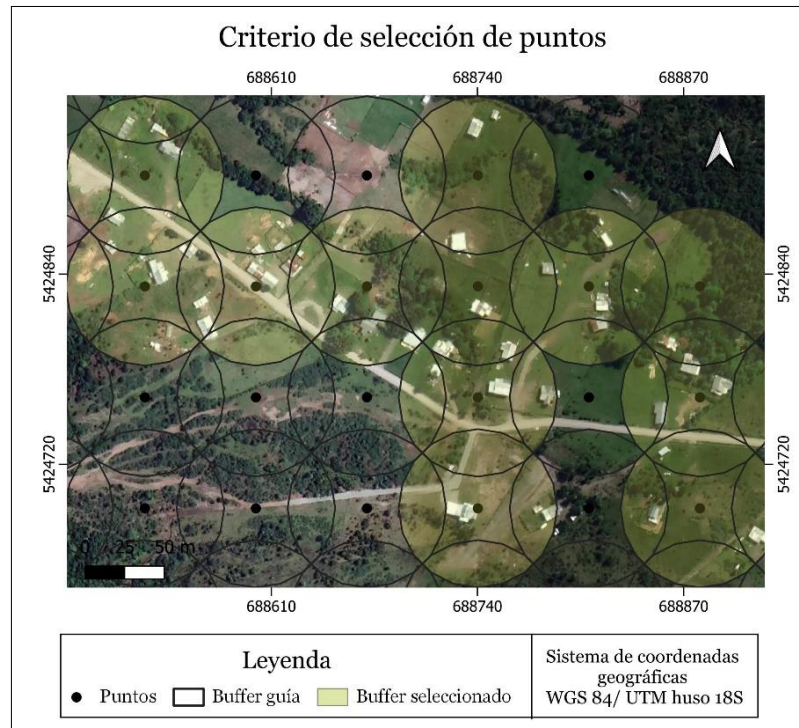


Figura 4.2. Ejemplo de criterio de selección de puntos. Los círculos verdes corresponden a los *buffers* guía seleccionados, por contener en su interior construcciones que cumplen con los requisitos de selección.

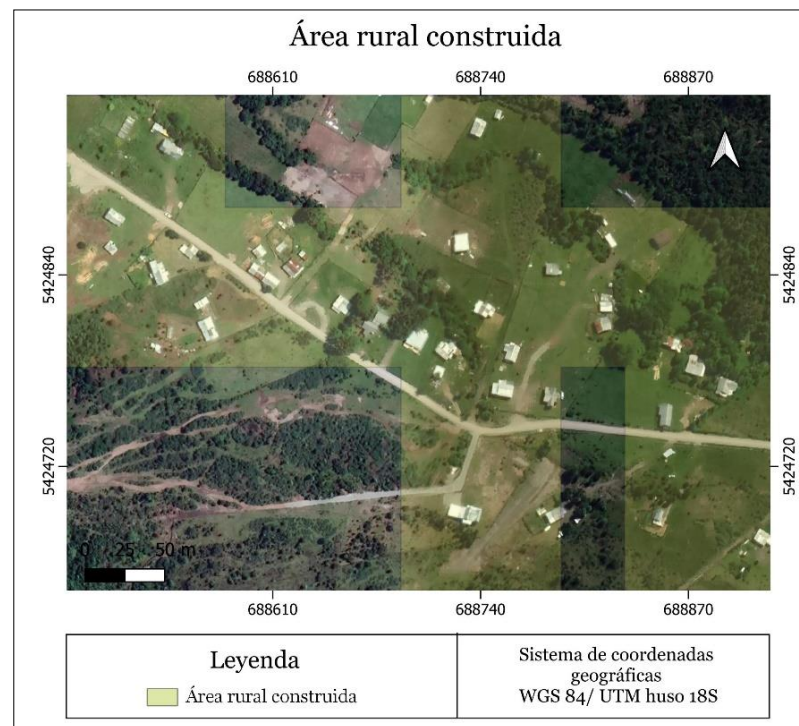


Figura 4.3. Área rural construida (ARC) a partir del criterio de selección de puntos.

Entonces, el ARC delimitada para cada volcán corresponde a polígonos cuadrados de $100 \times 100 \text{ m}^2$ que indican la ubicación de las viviendas. Sin embargo, estos son capas sin información censal, por lo que el siguiente paso corresponde a la intersección del ARC con las ECM, con el propósito de obtener una nueva capa poligonal con información sobre la distribución de construcciones y la cantidad de personas y viviendas que existen en una determinada entidad censal construida (ECC). Para este análisis se considera que el número de personas y viviendas de cada entidad se distribuye de manera uniforme dentro de cada una. Posteriormente, la intercepción de esta última capa con la zona de peligro representada en cada mapa de peligro volcánico, da origen a una entidad censal modificada de peligro (ECMP), como se muestra en la Figura 4.4.

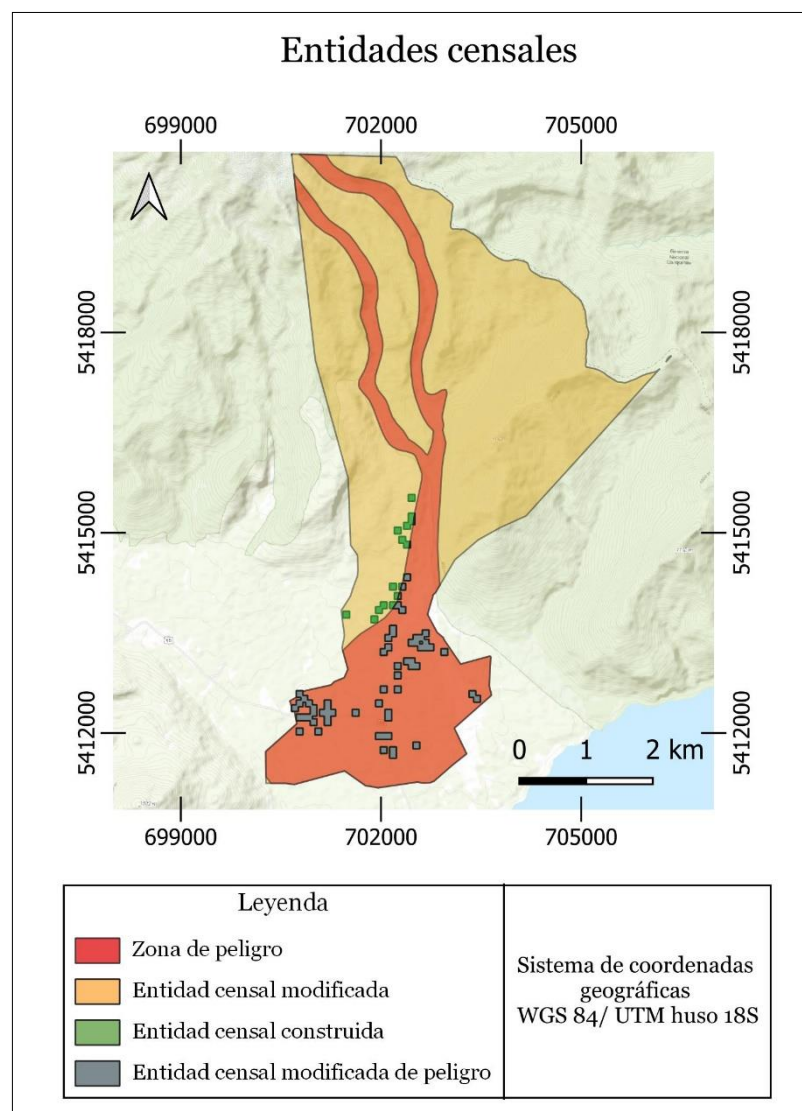


Figura 4.4. Representación de una entidad censal construida (ECC) perteneciente a una entidad censal modificada (ECM), que, interceptada con la zona de peligro da origen a una entidad censal modificada de peligro (ECMP).

4.1.1.2. Análisis de zonas edificadas en poblados

Se considera como poblado todas las ‘manzanas’ del área urbana definidas en el distrito censal (Figura 4.1). Sin embargo, también se consideraron otras localidades del área rural, como Los Queñes, Correntoso, Ensenada, Río Blanco-Colorado, Colonia Río Sur y Ralún, por considerarse sectores poblados dentro del área de influencia de potenciales peligros volcánicos. Estas localidades fueron delimitadas manualmente por medio de imágenes satelitales proporcionadas por *Open Street Maps* (OSM) en el *software* QGIS 3.24.

Si bien, el *shapefile* de manzanas del área urbana contiene información censal referente a la cantidad de personas y viviendas que habitan en un poblado, el área rural que fue delimitada manualmente carece de esta información. Es por esto que su procesamiento sigue el procedimiento del ARC mencionada anteriormente.

Es importante destacar que, con el aumento demográfico de la población, los límites de poblados y localidades no están bien definidos, ya que, en la práctica, la población asentada en las afueras se comporta como parte del mismo, ya que depende de estos centros urbanos para realizar muchas de sus actividades. Si bien, determinar los límites físicos de la influencia de un poblado no es algo trivial, ya que responde a variables sociales y demográficas complejas, se propone la construcción de un *buffer* circular en torno al área construida del poblado a evaluar, con el objetivo de incluir a la población, viviendas e infraestructuras circundante en las zonas adyacentes. El radio del *buffer* (B_r) está en función del área planimétrica del poblado (A_p), y se calcula como:

$$B_r = \sqrt{\frac{A_p}{\pi}}$$

Esto indica que todos los elementos ubicados dentro del *buffer* de cada poblado se consideran como parte del mismo, como se observa en la Figura 4.5. De esta forma, el área final de cada poblado corresponde al área total del *buffer*.

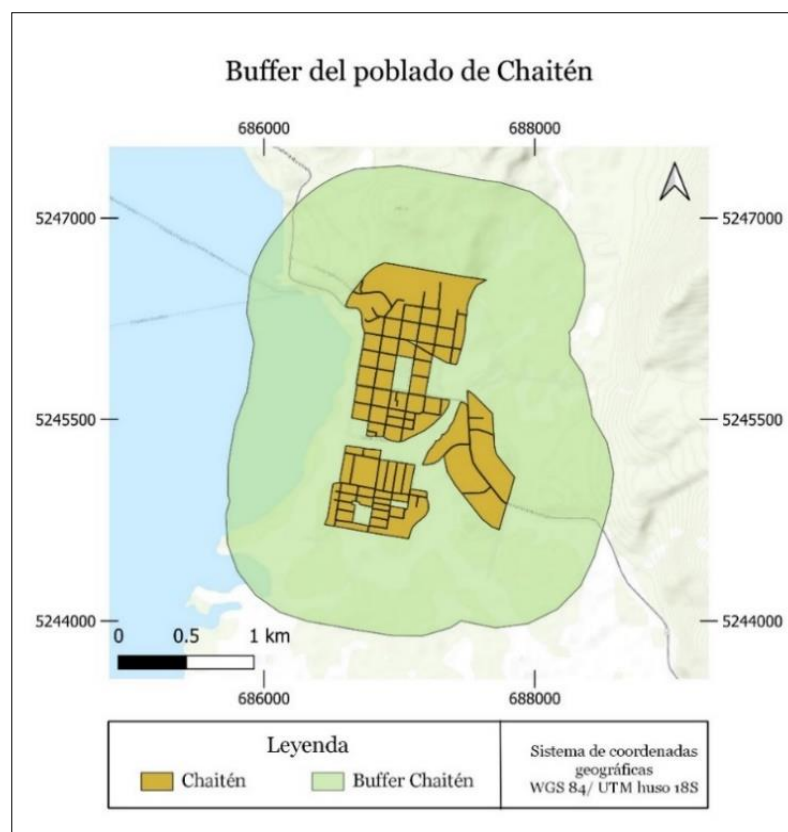


Figura 4.5. Representación del área planimétrica del poblado de Chaitén en relación al área total de su *buffer*.

4.1. 2. Cuantificación de los elementos expuestos

Para la evaluación de amenaza se desarrolló un sistema para cuantificar los elementos expuestos a los distintos niveles de peligro de un volcán, donde se le otorga un puntaje a cada activo según la categoría a la que pertenezca, en función de sus características y su tipo. En este estudio, la prioridad es incluir la mayor cantidad de elementos posibles y evaluarlos de una manera generalizada con respecto a su posible interacción con los peligros volcánicos. En virtud de esto, los ejes principales para la puntuación de cada elemento son: su importancia relativa ante una eventual crisis volcánica, y el rol que juega cada elemento en el funcionamiento normal de los poblados. Es importante mencionar que no se realizaron valoraciones monetarias ni consideraciones de vulnerabilidad de ningún tipo. El factor de exposición que pondera a cada activo a evaluar se muestra en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Factor de exposición atribuido a los distintos activos evaluados. CRPCA: camino regional, provincial, comunal y de acceso. CRP: camino regional principal. RI: ruta internacional. RNL: Ruta nacional longitudinal.

Factor de exposición	Personas / Vivienda	Rutas	Puentes	Aeropuertos/ Aeródromos	Colegios	Centros de salud	Bomberos/ carabineros/ municipios	Hidroeléctricas/ embalse
0,01	Viviendas							
0,05			Ubicados en CRPCA					
0,2			Ubicados en CRP					
0,3			Ubicados en RI					
0,4			Ubicados en RNL					
0,5		Calles/ CRPCA						
1	Personas							
2		CRP			1-100		Bomberos/ carabineros	
3		RI		Aeródromos	101-500	Atención primaria		Mini hidroeléctrica
4		RNL			501-1000	Atención secundaria	Municipios	Hidroeléctrica
5				Aeropuertos	1001-2000	Atención terciaria		Embalse
6					>2000			

4.1.2.1. Cuantificación de personas y viviendas

Es importante señalar que la base de esta evaluación de amenaza está centrada en la población, por lo que el factor prioritario son las personas, donde cada una recibe un punto de exposición. En tanto que cada vivienda representa 0,01 puntos de exposición. Esta diferencia de dos órdenes de magnitud entre personas y viviendas refleja el valor de las personas por sobre las infraestructuras, y mantiene un equilibrio con los puntajes de los demás elementos expuestos, ya que las viviendas, en cantidad, son muchas más que las infraestructuras críticas, por lo que el puntaje asignado limita la sobre-representación de las viviendas dentro de las infraestructuras.

4.1.2.2. Cuantificación de infraestructuras críticas

El resto de las infraestructuras son consideradas críticas, y corresponden a distintos elementos representados en forma de puntos o líneas que muestran la ubicación de instalaciones de relevancia estratégica. Según disponibilidad de datos, se consideraron colegios, centros de salud, municipios, cuerpos de bomberos, cuarteles de carabineros, centrales hidroeléctricas, aeródromos o aeropuertos, puentes y rutas. Las infraestructuras fueron agrupadas en base a afinidad de las funciones que en ellas se realizan para luego otorgarles un puntaje de exposición representativo.

Estos puntajes fueron asignados en función de la magnitud y/o importancia relativa de cada elemento dentro de las categorías en las que fueron agrupados, a la vez que mantienen un equilibrio con las demás categorías.

4.1.2.3. Infraestructuras de carácter social

Pertencen a este grupo todas las instalaciones que trabajan directamente con personas, que en este caso corresponden a centros de salud, establecimientos educacionales. Estos establecimientos satisfacen necesidades primarias en la población, siendo de suma relevancia en tiempos de emergencia, ya que en los centros de salud se atenderán las emergencias y los colegios podrían ser usados como albergues en caso de ser necesario.

Los centros de salud fueron divididos en tres niveles según su complejidad y cobertura: nivel primario, secundario y terciario, cada uno con puntajes diferidos. La mayoría de los establecimientos de atención primaria recibieron 3 puntos, a excepción de los consultorios generales rurales y urbanos que recibieron 4 puntos, al igual que los establecimientos que brindan atención secundaria; en tanto, los establecimientos de atención terciaria recibieron 5 puntos.

Por otro lado, los establecimientos educacionales se dividen en cinco tipos, según la cantidad de alumnos que presentan, en base a su matrícula total del año 2019. Aquellos cuya matrícula va de 1 a 100 alumnos se les otorgó 2 puntos, de 101 a 500 alumnos recibieron 3 puntos, de 501 a 1000 alumnos recibieron 4 puntos, de 1001 a 2000 alumnos recibieron 5 puntos y sobre 2000 alumnos recibieron 6 puntos.

4.1.2.4. Infraestructuras de respuesta

Esta categoría incluye a toda infraestructura que se considera clave al momento de tomar acción de respuesta frente a una eventual emergencia. Se incluye municipios, en su calidad de centros de decisión y gestión de emergencias, los cuales reciben 4 puntos cada uno; y cuarteles de carabineros y cuerpos de bomberos que reciben 2 puntos cada uno.

4.1.2.5. Infraestructuras de energía y suministro

Corresponde a infraestructuras generadoras de energía, como las centrales hidroeléctricas, categorizadas en mini hidráulicas de paso, que reciben 3 puntos cada una; hidráulicas de paso, que reciben 4 puntos; e hidráulicas embalse, que reciben 5 puntos. La capa de su ubicación geográfica fue elaborada por la Comisión Nacional de Energía (CNE).

4.1.2.6. Infraestructuras de transporte

Se incluyen las principales infraestructuras que permiten el transporte de personas y/o carga. Dentro de este grupo se encuentran aeropuertos, los cuales reciben 5 puntos, y aeródromos, que reciben 3 puntos cada uno.

Para el caso de los activos lineales, como las rutas, la red vial nacional que se utilizó fue la proporcionada por la BCN (2019), que corresponde a una capa polilínea de los caminos de Chile. Las vías principales reciben un puntaje de exposición en base a su rol, el cual tiene una nomenclatura que define el tipo de ruta, según la clasificación de la dirección de vialidad del ministerio de obras públicas de Chile, recibiendo un puntaje cada 10 km de ruta expuesta. Los caminos regionales provinciales, comunales, de acceso y caminos sin rol recibieron 0,5 puntos; los caminos regionales principales recibieron 2 puntos, las rutas internacionales recibieron 3 puntos, y finalmente las rutas nacionales longitudinales recibieron 4 puntos.

En la evaluación de los poblados, se consideran además las calles, que corresponden a una red vial que no es reconocida por ninguna base de datos y, por ende, no es clasificada con un rol. Estas rutas fueron delimitadas manualmente mediante imágenes satelitales de *Google Maps* a una escala de 1:1000, y se les asignó el puntaje según su longitud (10 km de ruta expuesta), de acuerdo a los caminos regionales, provinciales, comunales y de acceso.

Con respecto a los puentes, estos corresponden a una capa de puntos, que reciben un valor de exposición según el tipo de ruta de la cual forman parte. Donde cada uno de los puentes recibe un valor de exposición igual a la décima parte del puntaje correspondiente al tipo de ruta en la cual se ubican. Por ejemplo: Un puente que forma parte de una ruta internacional, cuyo puntaje es 3, tendrá un valor de 0,3 puntos. Por ende, el puntaje de puentes no tiene que ver con la longitud de estos. Los puentes se consideran como puntos críticos dentro de cada ruta, ya que el perjuicio o la destrucción de uno podría significar que poblaciones queden aisladas, atrapadas o imposibilitadas para evacuar en caso de emergencia.

4.1. 3. Exposición de personas

Para mayor comprensión, en la Tabla 4.2 se muestran las abreviaciones de los conceptos usados en los siguientes apartados.

Tabla 4.2. Términos utilizados en la evaluación.

Abreviación	Definición
ARC	Área rural construida
ECM	Entidades censales modificadas
ECC	Entidad censal construida
ECMP	Entidad censal modificada en zona de peligro
j	Una ECM determinada
k	Una ECMP determinada
i	Una infraestructura crítica determinada
b	Un puente determinado
r	Una ruta determinada
P	Personas
V	Viviendas
Ic	Infraestructuras críticas
B	Puentes
R	Rutas

Uno de los objetivos principales de la evaluación es conocer cuantas de las personas que se ubican en una ECM, se encuentran expuestas a algún peligro proveniente de un volcán. Para esto, es necesario interceptar el *shapefile* de ECC con las zonas de peligro volcánico, para posteriormente determinar la cantidad de personas expuestas ($P_{j,k}$) en una determinada área que se encuentra en una zona de peligro volcánico o ECMP (Ver Figura 4.4), mediante la siguiente ecuación:

$$(1) \quad P_{j,k} = \frac{\text{Área}_k}{\text{Área}_j} \times nP_j$$

Donde;

Área_k = área de una ECMP en una ECM

Área_j = área de una ECM

nP_j = total de personas en una ECM

La cuantificación del valor de exposición de personas ($EP_{j,k}$) esta en función de la cantidad de personas expuestas ($P_{j,k}$) y del factor de exposición de personas (F_p), como se muestra en la ecuación:

$$(2) \quad EP_{j,k} = P_{j,k} \times F_p$$

Así, el valor de exposición de personas en una ECMj determinada (EP_j), corresponde a la sumatoria de los valores de exposición de personas de todas las ECMPk que se ubican en esta ECMj ($EP_{j,k}$), cómo se indica:

$$(3) \quad EP_j = \sum_{k \in j} EP_{j,k} \quad j, k \in \text{volcán}$$

Finalmente, el valor de exposición de personas en un volcán en particular ($EP_{\text{volcán}}$) corresponde a la sumatoria de los valores de exposición de personas de todas las ECMj que pertenecen al volcán (EP_j), como se expresa en la siguiente ecuación:

$$(4) \quad EP_{\text{volcán}} = \sum_j EP_j \quad j \in \text{volcán}$$

4.1. 4. Exposición de infraestructuras

La evaluación de infraestructuras es análoga a la de personas, por lo que la determinación de la cantidad de viviendas expuestas ($V_{j,k}$) se obtiene mediante la expresión:

$$(5) \quad V_{j,k} = \frac{\text{Área}_k}{\text{Área}_j} \times nV_j$$

Donde; Área_k = área de una ECMP en una ECM

Área_j = área de una ECM

nV_j = total de viviendas en una ECM

Por su parte, el valor de exposición de viviendas ($EV_{j,k}$) se determina como la multiplicación entre la cantidad de viviendas expuestas ($V_{j,k}$) y el factor de exposición de viviendas (F_v), como se muestra a continuación:

$$(6) \quad EV_{j,k} = V_{j,k} \times F_v$$

Así, el valor de exposición de viviendas en una ECMj determinada (EV_j), corresponde a la sumatoria de los valores de exposición de viviendas de todas las ECMPk que se ubican en esta ECMj ($EV_{j,k}$), como la ecuación indica:

$$(7) \quad EV_j = \sum_{k \in j} EV_{j,k} \quad j, k \in \text{volcán}$$

Finalmente, el valor de exposición de viviendas en un volcán en particular ($EV_{\text{volcán}}$) corresponde a la sumatoria de los valores de exposición de viviendas de todas las ECMj que pertenecen al volcán (EV_j), como se expresa en la ecuación:

$$(8) \quad EV_{\text{volcán}} = \sum_j EV_j \quad j \in \text{volcán}$$

Por otro lado, todas las infraestructuras críticas (Ic_i) representadas por un *shapefile* de punto, a excepción de los puentes, ósea aeropuertos, centros de educación, establecimientos de salud, bomberos, carabineros, municipios e hidroeléctricas, tienen asignado el puntaje de su factor de exposición (F_i). Por lo que el valor de exposición de una infraestructura crítica en particular (EIc_i) está determinado por la siguiente expresión:

$$(9) \quad EIc_i = F_i$$

De esta forma, el valor de exposición de las infraestructuras críticas de un volcán ($EIc_{\text{volcán}}$) corresponde a:

$$(10) \quad EIc_{\text{volcán}} = \sum_i EIc_i \quad i \in \text{volcán}$$

Para el caso de los puentes (B_b) que se encuentren expuestos a una zona de peligro, su valor de exposición (EB_b) está en función de la ruta a la que pertenecen, y corresponde al factor de exposición de ese puente (F_b), como se muestra en la ecuación:

$$(11) \quad EB_b = F_b$$

Así, el valor de exposición de puentes de un volcán ($EB_{\text{volcán}}$) corresponde a:

$$(12) \quad EB_{\text{volcán}} = \sum_b EB_b \quad b \in \text{volcán}$$

En tanto, para las infraestructuras críticas representadas por activos lineales, como lo son las rutas (R_r), su valor de exposición por tramo (ER_r) se calcula como el producto entre la longitud de la ruta expuesta a alguna zona de peligro volcánico en metros (m_r), dividida por 10.000, ya que

reciben un puntaje cada 10 km de ruta; y el factor de exposición correspondiente al tipo de ruta (F_r), según la ecuación:

$$(13) \quad ER_r = \left(\frac{m_r}{10.000} \right) \times F_r$$

De esta forma, el valor de exposición de las rutas de un volcán ($ER_{volcán}$) corresponde a:

$$(14) \quad ER_{volcán} = \sum_r ER_r \quad r \in volcán$$

4.1. 5. Exposición total

La exposición total de un volcán ($ET_{volcán}$) se calcula como la suma euclidiana entre la exposición de personas en el volcán ($EP_{volcán}$) y la exposición de viviendas ($EV_{volcán}$), infraestructuras críticas ($EIC_{volcán}$), puentes ($EB_{volcán}$) y rutas ($ER_{volcán}$) de ese volcán:

$$(15) \quad ET_{volcán} = \sqrt{(EP_{volcán})^2 + (EV_{volcán} + EIC_{volcán} + EB_{volcán} + ER_{volcán})^2}$$

$$(16) \quad ET_{volcán} = \sqrt{\left(\sum_j EP_j \right)^2 + \left(\sum_j EV_j + \sum_i EIC_i + \sum_b EB_b + \sum_r ER_r \right)^2} \quad j, i, b, r \in volcán$$

Para el caso de los poblados, el método y las ecuaciones utilizadas para determinar la exposición de todos los elementos evaluados (personas, viviendas e infraestructuras críticas) son las mismas que para los volcanes, solo que el área de evaluación corresponde a la delimitada por el *buffer* de cada poblado.

4.2. ANÁLISIS DE AMENAZA

4.2. 1. Cuantificación de las zonas de peligro

Con el objetivo de cuantificar las zonas de peligro delimitadas en los mapas de peligro del SERNAGEOMIN, se otorgó un valor numérico o puntaje a cada una de ellas en base al nivel de peligro relativo indicado en la leyenda de cada mapa y a la cuantificación de las zonas de peligro

determinadas en estudios realizados anteriormente por Jorquera (2018), Álvarez (2020) y Arias (2020) en los volcanes Callaqui, Tolhuaca, Lonquimay, Llaima, Villarrica y Mocho-Choshuenco. En dichos trabajos se analizaron y construyeron mapas de peligro integrado, que exponen la distribución del peligro combinado por corrientes de densidad piroclástica, flujos de lava, lahares, caída de tefra y proyectiles balísticos volcánicos, donde las zonas de peligro fueron superpuestas con el objetivo de destacar las áreas donde múltiples fenómenos confluyen espacialmente.

Esta cuantificación muestra que cada zona obtiene un puntaje que va de 0 a 126. Como el máximo valor que puede obtener una zona por sí sola es 126, todas las zonas que exceden esta cifra son consideradas de “muy alto peligro”. El valor de peligro más alto fue 220, alcanzado por el volcán Llaima. Así, dada la distribución lineal de las zonas de peligro, los valores bajo 126 fueron divididos en 4 tramos principales, donde el promedio de cada uno, redondeado al múltiplo de 10 más cercano, corresponde finalmente al valor asignado a las zonas de peligro. Se agregó además una zona de “muy bajo peligro”, a la que se le otorga la mitad del puntaje de la zona de bajo peligro. Si bien, este nivel no está presente en los mapas evaluados en estos escritos, sí están presente en los mapas de peligro del SERNAGEOMIN de otros volcanes sujetos a la evaluación de amenaza volcánica. Los valores asignados de las zonas de peligro representadas en los mapas se muestran en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Puntajes asignados a cada zona de peligro de los mapas de peligro volcánico del SERNAGEOMIN, en base a la clasificación de los mapas de peligro integrado.

Zona de peligro	Tramos de peligro	Valor asignado
Muy alto	126-220	170
Alto	80-126	100
Moderado	40-80	60
Bajo	0-40	20
Muy bajo	-	10

En las áreas donde dos zonas de peligro se superponen, se consideró el valor de la zona de mayor peligro. Por ejemplo, si una zona de bajo peligro de lavas y/o lahares está cubierta por una zona de alto peligro de flujos piroclásticos, esa zona fue considerada de alto peligro. Las zonas de caída de ceniza fueron consideradas de “bajo peligro”, y están representadas en los mapas de peligro por la envolvente (máxima extensión que puede ser afectada por procesos volcánicos de cierta magnitud y recurrencia) del área con 25% de probabilidad anual de acumulación de, al menos, 10 cm de material piroclástico de caída, o bien, la envolvente que indica 10 cm de acumulación de manto piroclástico. En los volcanes donde dicha zona no está presente, se utilizó la isópaca más externa de caída de piroclastos (ceniza) disponible. Las proyecciones balísticas se consideran de

“muy alto peligro”. Todas estas modificaciones fueron parte del proceso de digitalización y homogenización de mapas para unificar la representación y distribución de los distintos peligros en cada mapa del SERNAGEOMIN, la cual difería entre ellos.

4.2. 2. Factores de evaluación

Cada mapa de peligro del SERNAGEOMIN informa sobre los distintos niveles de peligro al que está sometido un volcán en particular. Sin embargo, estos niveles no pueden ser comparados entre volcanes, porque cada uno tiene un nivel de peligrosidad definido por criterios específicos. Es por esto que es necesario incorporar a la metodología un parámetro o factor que permita informar sobre el peligro relativo que cada volcán presenta respecto a otros, permitiendo la comparación de los niveles de peligro entre diferentes volcanes. Por ende, para estimar la amenaza volcánica, se propuso el uso de dos factores: recurrencia y peligro.

4.2.2.1. Factor de recurrencia

Este factor está basado en la historia eruptiva de cada volcán, desde el año 1800 hasta la actualidad. Se utilizaron registros provenientes de Petit-Breuilh (2004) y de la base de datos del Global Volcanism Program de Smithsonian Institution realizando el conteo de erupciones de VEI ≥ 2 , y de VEI < 2 sólo si registran lavas y/o flujos piroclásticos como producto. El número de erupciones (Anexo 9), fue incorporado a una misma escala numérica, por medio de la función: $\ln(e + N)$, donde e es el número Euler y N el número de erupciones. Se utiliza una escala logarítmica para que este factor sea ≥ 1 , y porque su gráfica representa de mejor manera el amplio rango de erupciones entre volcanes, estandarizándolas y limitando el sesgo entre ellas. El resultado final representa el factor de recurrencia de cada volcán (Tabla 4.4), siendo este proporcional al número de erupciones de cada uno.

4.2.2.2. Factor de peligro

Este factor es una representación del nivel de peligrosidad de cada volcán, cuyo puntaje es obtenido tras evaluar y sumar todos los factores de peligros del ranking de riesgo específico propuesto por el SERNAGEOMIN (2019), adaptado del NVEWS (2005): tipo de volcán, máximo VEI en Holoceno, actividad explosiva < 5000 años, actividad explosiva < 500 años, recurrencia eruptiva, ocurrencia de lavas, flujos piroclásticos, lahares, tsunamis, potencial de explosiones hidrotermales, colapso de flancos, generación de lahares primarios, episodios de “*unrest*” o actividad interna anómala. A diferencia del factor de recurrencia, el factor de peligro de cada volcán (Tabla 4.4) no es proporcional al número de erupciones.

Tabla 4.4. Factor de recurrencia y factor de peligro de los volcanes de estudio.

Centro eruptivos	N° de erupciones (N)	Factor de recurrencia $\ln(e + N)$	Factor de peligro
Tupungatito	18	3.031016	13
Co Azul-Quizapu	14	2.816503	21
Co. Planchón-Peteroa	12	2.68909	18
Calbuco	8	2.371951	21
Hudson	6	2.165422	21
Osorno	4	1.904832	21
San Pedro	2	1.551445	11
Chaitén	2	1.551445	20
Quetrupillán	1	1.313262	12
Taapacá	0	1	9

4.2. 3. Cuantificación de la amenaza absoluta

Al incorporar uno de estos factores a la evaluación de la amenaza volcánica, es posible comparar la influencia de las zonas de peligro entre distintos volcanes, describiendo así, el peligro relativo de cada volcán.

De esta forma, la amenaza absoluta (A) está en función de la exposición de los elementos evaluados: personas (EP), viviendas (EV), infraestructuras críticas (EIC), puentes (EB) y rutas (ER); el valor de la zona de peligro asociado (H); y el factor de peligro o recurrencia (Fp o Fr), que es intrínseco de cada volcán.

4.2.3.1. Amenaza absoluta de personas

La ecuación que representa la amenaza absoluta de personas (AP_j) en una ECM $_j$ en particular corresponde a:

$$(17) \quad AP_j = \sum_{k \in j} EP_{j,k} \times H_k \times (Fp \text{ o } Fr)_{volcán} \quad j, k \in volcán$$

Así, la amenaza absoluta de personas en un volcán ($AP_{volcán}$) está determinada por:

$$(18) \quad AP_{volcán} = \sum_j AP_j \quad j \in volcán$$

4.2.3.2. Amenaza absoluta de infraestructuras

La ecuación que define la amenaza absoluta de viviendas (AV_j) en una ECM $_j$ en particular corresponde a:

$$(19) \quad AV_j = \sum_{k \in j} EV_{j,k} \times H_k \times (Fp \text{ o } Fr)_{volcán} \quad j, k \in volcán$$

De esta forma, la amenaza absoluta de viviendas en un volcán ($AV_{volcán}$) está determinada por la siguiente ecuación:

$$(20) \quad AV_{volcán} = \sum_j AV_j \quad j \in volcán$$

Por otro lado, la expresión que determina la amenaza absoluta de una infraestructura crítica en particular (AIC_i) corresponde a:

$$(21) \quad AIC_i = EIC_i \times H_i \times (Fp \text{ o } Fr)_{volcán} \quad i \in volcán$$

En tanto que la amenaza absoluta de infraestructuras críticas en un volcán ($AIC_{volcán}$) se define como:

$$(22) \quad AIC_{volcán} = \sum_i AIC_i \quad i \in volcán$$

De la misma forma, la ecuación que representa la amenaza absoluta de un puente en particular (AB_b) corresponde a:

$$(23) \quad AB_b = EB_b \times H_b \times (Fp \text{ o } Fr)_{volcán} \quad b \in volcán$$

En tanto que la amenaza absoluta de puentes en un volcán ($AB_{volcán}$) se interpreta como:

$$(24) \quad AB_{volcán} = \sum_b AB_b \quad b \in volcán$$

Por otro lado, la expresión que define la amenaza absoluta de un tramo de ruta en particular (AR_r) es la siguiente:

$$(25) \quad AR_r = ER_r \times H_r \times (Fp \text{ o } Fr)_{volcán} \quad r \in volcán$$

Así, la amenaza absoluta de rutas en un volcán ($AR_{volcán}$) se calcula de la siguiente forma:

$$(26) \quad AR_{volcán} = \sum_r AR_r \quad r \in volcán$$

4.2.3.3. Amenaza absoluta total

Finalmente, la amenaza absoluta total de un volcán ($AT_{volcán}$) corresponde a la suma euclidiana de la amenaza absoluta de personas de un volcán ($AP_{volcán}$) y la amenaza absoluta de viviendas ($AV_{volcán}$), infraestructuras críticas ($AIC_{volcán}$), puentes ($AB_{volcán}$) y rutas ($AR_{volcán}$) de ese volcán:

$$(27) \quad AT_{volcán} = \sqrt{(AP_{volcán})^2 + (AV_{volcán} + AIC_{volcán} + AB_{volcán} + AR_{volcán})^2}$$

$$(28) \quad AT_{volcán} = \sqrt{\left(\sum_j AP_j\right)^2 + \left(\sum_j AV_j + \sum_i AIC_i + \sum_b AB_b + \sum_r AR_r\right)^2} \quad j, i, b, r \in volcán$$

Para el caso de los poblados, la amenaza absoluta de personas e infraestructuras se calcula de la misma forma que los volcanes, solo que el área de evaluación se restringe a la del *buffer* de cada poblado.

4.2. 4. Cuantificación de la amenaza normalizada

Si bien la amenaza absoluta es un buen indicador del valor de amenaza al que están sometidos los elementos expuestos, es importante reconocer el valor de los activos evaluados mediante un nuevo término, la amenaza normalizada o peligro ponderado. Ésta representa la amenaza individual promedio en volcanes y poblados, según la distribución de los diferentes elementos expuestos en las diferentes zonas de peligro, indicando donde estos se encuentran bajo un mayor nivel de peligro, independiente de su exposición total.

Sin embargo, la amenaza normalizada entre volcanes y poblados se obtiene de manera diferente. La amenaza normalizada en poblados ($An_{poblado}$) corresponde al peligro ponderado de toda la zona poblada, independiente si está expuesta a una zona de peligro o no, representando que el peligro del poblado es propio de este. En tanto, la amenaza normalizada en volcanes ($An_{volcán}$) corresponde al peligro ponderado en las zonas susceptibles de ser afectadas por peligros volcánicos, considerando solo elementos expuestos y representando así, la amenaza que imparte el volcán.

4.2.4.1. Amenaza normalizada de personas

De esta forma, la amenaza normalizada de personas en un volcán ($AnP_{volcán}$) corresponde al cociente entre la amenaza absoluta de personas en el volcán ($AP_{volcán}$) y la exposición de personas de ese volcán ($EP_{volcán}$):

$$(29) \quad AnP_{volcán} = \frac{AP_{volcán}}{EP_{volcán}}$$

En tanto, la amenaza normalizada de personas en un poblado ($AnP_{poblado}$) corresponde al cociente entre la amenaza absoluta de personas en el poblado ($AP_{poblado}$) y el total de personas que habitan en ese poblado ($P_{poblado}$), independiente si se encuentran expuestas o no a algún nivel de peligro por parte del volcán aledaño:

$$(30) \quad AnP_{poblado} = \frac{AP_{poblado}}{P_{poblado}}$$

4.2.4.2. Amenaza normalizada de infraestructuras

Por otro lado, la amenaza normalizada de viviendas en un volcán ($AnV_{volcán}$) corresponde al cociente entre la amenaza absoluta de viviendas en el volcán ($AV_{volcán}$) y la exposición de viviendas de ese volcán ($EV_{volcán}$):

$$(31) \quad AnV_{volcán} = \frac{AV_{volcán}}{EV_{volcán}}$$

Mientras que la amenaza normalizada de viviendas en un poblado ($AnV_{poblado}$) corresponde al cociente entre la amenaza absoluta de viviendas en el poblado ($AV_{poblado}$) y el valor total de viviendas en ese poblado ($V_{poblado}$), independiente si se encuentran expuestas o no a algún nivel de peligro por parte del volcán aledaño:

$$(32) \quad AnV_{poblado} = \frac{AV_{poblado}}{V_{poblado}}$$

El procedimiento para el resto de las infraestructuras es el mismo que para personas y viviendas, por lo que la ecuación que define la amenaza normalizada de infraestructuras críticas en un volcán ($AnIc_{volcán}$) es la siguiente:

$$(33) \quad AnIc_{volcán} = \frac{AIC_{volcán}}{EIC_{volcán}}$$

En tanto, la expresión que define la amenaza normalizada de infraestructuras críticas en un poblado ($AnIc_{poblado}$) corresponde a:

$$(34) \quad AnIc_{poblado} = \frac{AIC_{poblado}}{IC_{poblado}}$$

En tanto, la ecuación que representa la amenaza normalizada de puentes en un volcán ($AnB_{volcán}$) es la siguiente:

$$(35) \quad AnB_{volcán} = \frac{AB_{volcán}}{EB_{volcán}}$$

Y la expresión que determina la amenaza normalizada de puentes en un poblado ($AnB_{poblado}$) es:

$$(36) \quad AnB_{poblado} = \frac{AB_{poblado}}{B_{poblado}}$$

Así, la fórmula que define la amenaza normalizada de rutas en un volcán ($AnR_{volcán}$) corresponde a:

$$(37) \quad AnR_{volcán} = \frac{AR_{volcán}}{ER_{volcán}}$$

Y la expresión que determina la amenaza normalizada de rutas en un poblado ($AnR_{poblado}$) es:

$$(38) \quad AnR_{poblado} = \frac{AR_{poblado}}{R_{poblado}}$$

4.2.4.3. Amenaza normalizada total

Finalmente, la amenaza normalizada total de un volcán ($AnT_{volcán}$) corresponde al cociente entre la amenaza absoluta total de un volcán ($AT_{volcán}$) y la exposición total del mismo ($ET_{volcán}$), como se muestra en las siguientes expresiones:

$$(39) \quad AnT_{volcán} = \frac{AT_{volcán}}{ET_{volcán}}$$

$$(40) \quad AnT_{volcán} = \frac{\sqrt{(AP_{volcán})^2 + (AV_{volcán} + AIC_{volcán} + AB_{volcán} + AR_{volcán})^2}}{\sqrt{(EP_{volcán})^2 + (EV_{volcán} + EIC_{volcán} + EB_{volcán} + ER_{volcán})^2}}$$

$$(41) \quad AnT_{volcán} = \frac{\sqrt{(\sum_j AP_j)^2 + (\sum_j AV_j + \sum_i AIC_i + \sum_b AB_b + \sum_r AR_r)^2}}{\sqrt{(\sum_j EP_j)^2 + (\sum_j EV_j + \sum_i EIC_i + \sum_b EB_b + \sum_r ER_r)^2}} \quad j, i, b, r \in volcán$$

Por otro lado, la amenaza normalizada total de un poblado ($AnT_{poblado}$) consiste en el cociente entre la amenaza absoluta total del poblado ($AT_{poblado}$) y la suma euclidiana del valor total de elementos de ese poblado, independiente si se encuentran expuestos a peligros volcánicos:

$$(42) \quad AnT_{poblado} = \frac{\sqrt{(AP_{poblado})^2 + (AV_{poblado} + AIC_{poblado} + AB_{poblado} + AR_{poblado})^2}}{\sqrt{(P_{poblado})^2 + (V_{poblado} + IC_{poblado} + B_{poblado} + R_{poblado})^2}}$$

$$(43) \quad AnT_{poblado} = \frac{\sqrt{(\sum_j AP_j)^2 + (\sum_j AV_j + \sum_i AIC_i + \sum_b AB_b + \sum_r AR_r)^2}}{\sqrt{(\sum_j P_j)^2 + (\sum_j V_j + \sum_i IC_i + \sum_b B_b + \sum_r R_r)^2}} \quad j, i, b, r \in poblado$$

Para el caso de los poblados expuestos a peligros provenientes de dos o más volcanes, el valor de amenaza absoluta total o amenaza normalizada total del poblado corresponde a la sumatoria de cada amenaza de los volcanes que afectan al poblado a evaluar. Por ejemplo, en el la localidad de Ensenada, se produce un traslape de las potenciales áreas de riesgo del volcán Calbuco y Osorno, específicamente en lo que refiere a lahares. Por ende, el valor de amenaza absoluta y normalizada total de este poblado corresponde a la suma entre las amenazas absolutas y normalizadas de Ensenada por parte del volcán Calbuco y del volcán Osorno.

5. RESULTADOS

En esta sección se mostrarán los resultados obtenidos de la evaluación de amenaza volcánica, los cuales corresponden a tablas que indican los valores de exposición y amenaza de todos los activos evaluados, y que se representan visualmente en mapas de exposición (Anexo 1) y de amenaza volcánica.

Como se explicó en el capítulo 4, los valores de amenaza fueron obtenidos utilizando tanto el factor de recurrencia como el factor de peligro por separado, con el objetivo de contrastar los resultados y así determinar cuál es el factor que entrega un valor más representativo de la amenaza, tanto para volcanes como para los poblados aledaños a estos.

5.1. COMPLEJO VOLCÁNICO TAAPACÁ

En la Tabla 5.1 se muestra el puntaje de exposición y amenaza de la población e infraestructuras (viviendas, colegios, hospitales, municipios, bomberos, carabineros, centrales hidroeléctricas, aeródromos, rutas y puentes) que están sometidas a peligros derivados del complejo volcánico Taapacá. Este Complejo no registra erupciones en los últimos 1800 años, por lo que el factor de recurrencia se considera 1. En tanto que el factor de peligro corresponde a 9, según el ranking de riesgo específico en territorio nacional (SERNAGEOMIMN, 2019).

Tabla 5.1. Valores de exposición y amenaza de personas e infraestructuras del complejo volcánico Taapacá.

Peligro	Zona de peligro		Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto	Total
	Puntaje		10	20	60	100	170	
Exposición	Personas		0	2	0	1750	0	1752,49
	Infraestructuras	Viviendas	0	0,04	0	5,65	0	
		Centros de educación	0	0	0	5	0	
		Centros de salud	0	0	0	4	0	
		Municipios	0	0	0	4	0	
		Bomberos	0	0	0	0	0	
		Carabineros	0	0	0	2	0	
		Hidroeléctricas	0	0	0	0	0	
		Aeródromos	0	0	0	0	0	
		Rutas	0	6,50	8,61	5,80	0	
		Puentes	0	0	0	0	0	

Peligro	Zona de peligro			Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto	Total	
	Puntaje			10	20	60	100	170		
Amenaza absoluta	Factores	Recurrencia	Personas	1	0	40	0	175000	0	175070,95
			Infraestructuras		0	130,72	516,32	2644,73	0	
	Peligro	Personas	9	0	360	0	1575000	0	1575638,55	
		Infraestructuras		0	1176,52	4646,91	23802,54	0		
Amenaza normalizada	Factores	Recurrencia	Personas	1	0	0,02	0	99,89	0	99,90
			Infraestructuras		0	3,14	12,41	63,59	0	
	Peligro	Personas	9	0	0,21	0	898,97	0	899,08	
		Infraestructuras		0	28,29	111,73	572,33	0		

Como se puede observar, el 99% de la población y viviendas se encuentran amenazadas por un alto nivel de peligro, y el 1% restante por un bajo nivel de peligro. En tanto que el 58% de las infraestructuras críticas expuestas están afectadas solo por la zona de alto peligro, el 24% por la zona de moderado peligro, y el 18% restante se encuentran amenazadas por la zona de bajo peligro.

El único activo que se encuentra amenazado por un nivel de moderado peligro son las rutas, las que también se exponen a las zonas de bajo y alto peligro volcánico. Dentro de las rutas más amenazadas se encuentra el camino regional principal A-23, el cual cruza por casi toda la extensión de la zona de peligro del complejo volcánico Taapacá (Figura 5.1.). Con menor influencia en el mapa de amenaza, la ruta internacional 11-CH, que se ubica en el sector suroriental de este complejo, también se posiciona como una ruta de interés, debido a que su potencial amenaza por las zonas de bajo, moderado y alto peligro (Anexo 8), podrían dificultar su conectividad con otras rutas mayores. Por su parte, el camino regional, provincial, comunal y de acceso A-125 también es amenazado por los tres niveles de peligro, sin embargo, como se ubica en el sector nororiental y los peligros volcánicos de mayor envergadura están dirigidos al sector suroccidental, el valor de amenaza de esta ruta no es tan elevada como el proporcionado por los camino regional, provincial, comunal y de acceso del poblado de Putre, que se ubica a los pies del complejo.

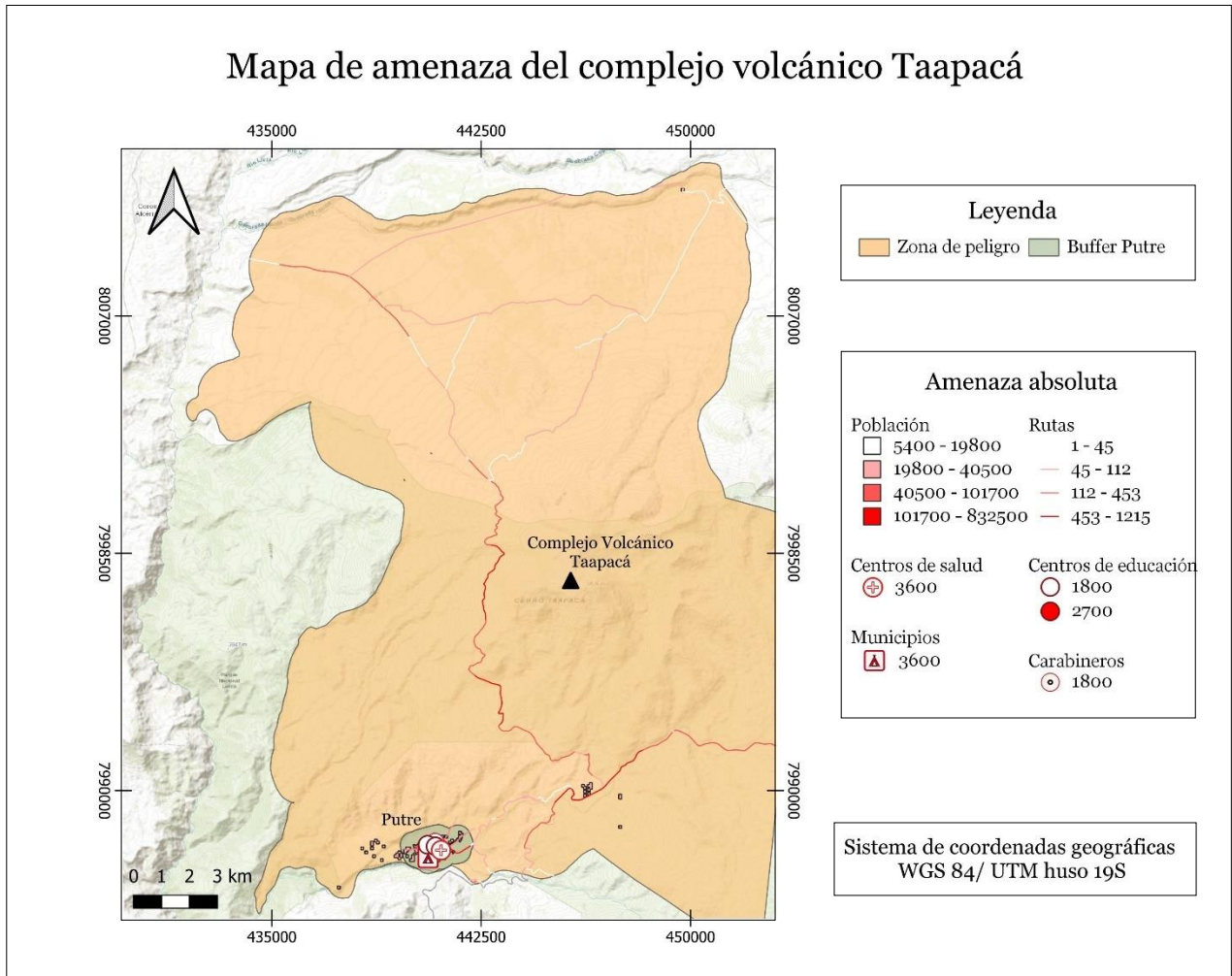


Figura 5.1. Mapa de amenaza del complejo volcánico Taapacá. Elaboración propia.

5.1. 1. Putre

El principal centro poblado de la zona altiplánica que se encuentra expuesto a los peligros del complejo volcánico Taapacá, corresponde a la localidad de Putre ($18^{\circ}11'47''S$ $69^{\circ}33'33''W$), la que se ubica a 23 km al SW de este centro eruptivo, en la región de Arica y Parinacota, en una subcuenca a 3.500 msnm, situado en la precordillera o sierra de Arica (Borgel, 1983 en Rodríguez *et al.*, 2017). La precordillera en este sector está conformada a partir de la acción tectónica y volcánica, así como también por procesos morfológicos derivados de numerosos aluviones y remociones en masa desencadenadas en el área (Seydried *et al.*, 1998 en Rodríguez *et al.*, 2017). Los resultados de exposición y amenaza de todos los activos evaluados se resumen en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Valores de exposición y amenaza de personas e infraestructuras de Putre.

Peligro	Zona de peligro		Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto	Total		
	Puntaje		10	20	60	100	170			
Exposición	Personas		0	0	0	1732	0	1732,13		
	Infraestructuras	Viviendas	0	0	0	5,38	0			
		Centros de educación	0	0	0	5	0			
		Centros de salud	0	0	0	4	0			
		Municipios	0	0	0	4	0			
		Bomberos	0	0	0	0	0			
		Carabineros	0	0	0	2	0			
		Hidroeléctricas	0	0	0	0	0			
		Aeródromos	0	0	0	0	0			
		Rutas	0	0	0	0,09	0			
		Calles	0	0	0	0,44	0			
		Puentes	0	0	0	0	0			
Amenaza absoluta	Factores	Recurrencia	Personas	1	0	0	0	173200	0	173212,62
			Infraestructuras		0	0	0	2091,05	0	
	Peligro	Personas	9	0	0	0	1558800	0	1558913,60	
		Infraestructuras		0	0	0	18819,48	0		
Amenaza normalizada	Factores	Recurrencia	Personas	1	0	0	0	100	0	100,00
			Infraestructuras		0	0	0	100	0	
	Peligro	Personas	9	0	0	0	900	0	900,00	
		Infraestructuras		0	0	0	900	0		

Como se observa, una eventual erupción de este edificio volcánico podría afectar a la totalidad de personas e infraestructuras ubicadas en Putre, sometiéndolas a un alto nivel de peligro. Es importante destacar que el 98% de las personas que se encuentran expuestas a alguna zona de peligro del complejo volcánico Taapacá se localizan en el poblado de Putre.

Las rutas más amenazadas se ubican en el sector este de Putre (Figura 5.2.), y corresponden a los caminos regionales, provinciales, comunales y de acceso A-149 y A-147. El resto de las rutas se clasifican como calles sin rol definido.

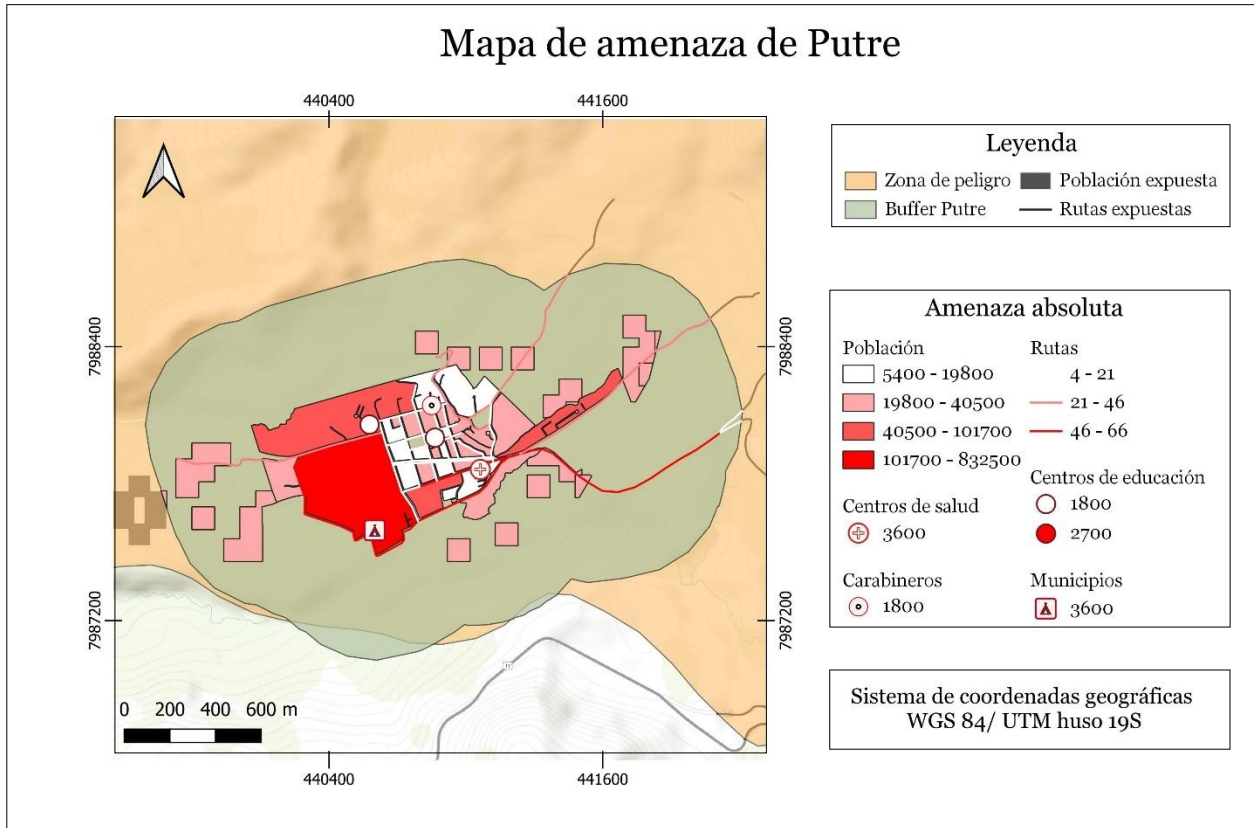


Figura 5.2 Mapa de amenaza del poblado de Putre. Elaboración propia.

5.2. VOLCÁN SAN PEDRO

En la Tabla 5.3 se muestran los valores de exposición y amenaza de los activos susceptibles a ser afectados por los diversos peligros del volcán San Pedro. Para el caso de este volcán, el factor de recurrencia es 1,55, y como se explicó en el apartado de metodología, está en función de la ecuación: $\ln(e + 2)$, que indica que solo 2 de las erupciones reportadas en los últimos 1800 años, cumplen con las condiciones del estudio y han sido consideradas para la evaluación de amenaza. En tanto, el factor de peligro, según el ranking de riesgo específico del SERNAGEOMIN (2019), corresponde a 11.

Tabla 5.3. Valores de exposición y amenaza de personas e infraestructuras del volcán San Pedro.

Peligro	Zona de peligro		Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto	Total	
	Puntaje		10	20	60	100	170		
Exposición	Personas		0	11	0	0	0	17,63	
	Infraestructuras	Viviendas	0	0,09	0	0	0		
		Centros de educación	0	0	0	0	0		
		Centros de salud	0	0	0	0	0		
		Municipios	0	0	0	0	0		
		Bomberos	0	0	0	0	0		
		Carabineros	0	0	0	0	0		
		Hidroeléctricas	0	0	0	0	0		
		Aeródromos	0	0	0	0	0		
		Rutas	0	6,09	3,10	4,50	0		
		Puentes	0	0	0	0	0		
Amenaza absoluta	Factores	Recurrencia	Personas	1,55	0	341,32	0	0	1226,29
			Infraestructuras		0	191,71	288,50	697,62	
	Peligro	Personas	11	0	2420	0	0	0	8694,59
		Infraestructuras		0	1359,24	2045,52	4946,26	0	
Amenaza normalizada	Factores	Recurrencia	Personas	1,55	0	31,03	0	0	69,57
			Infraestructuras		0	13,92	20,95	50,65	
	Peligro	Personas	11	0	220	0	0	0	493,24
		Infraestructuras		0	98,68	148,50	359,10	0	

Como se observa en la Tabla 5.3, el total de personas y viviendas expuestas a los peligros del volcán San Pedro, se distribuyen en la zona de bajo peligro. Por otro lado, no existen infraestructuras de carácter social, respuesta, energía y suministro, expuestas a ningún nivel de peligro, por lo que su amenaza es 0.

Las rutas son la única infraestructura de transporte que se encuentran bajo una eventual amenaza por las zonas de bajo, moderado y alto peligro volcánico. El mapa de amenaza del volcán San Pedro (Figura 5.3.), evidencia como la ruta internacional 21 CH, que cruza todo el sector occidental de la zona de peligro volcánico, es considerada la más amenazada, debido a que, en caso de una posible erupción, esta ruta estaría expuesta a tres niveles de peligro (Anexo 8), obstaculizando su uso como vía de evacuación.

Es importante destacar que el poblado más cercano a este volcán corresponde a San Pedro, sin embargo, este no está expuesto a ninguna zona de peligro, por ende, no presenta amenaza.

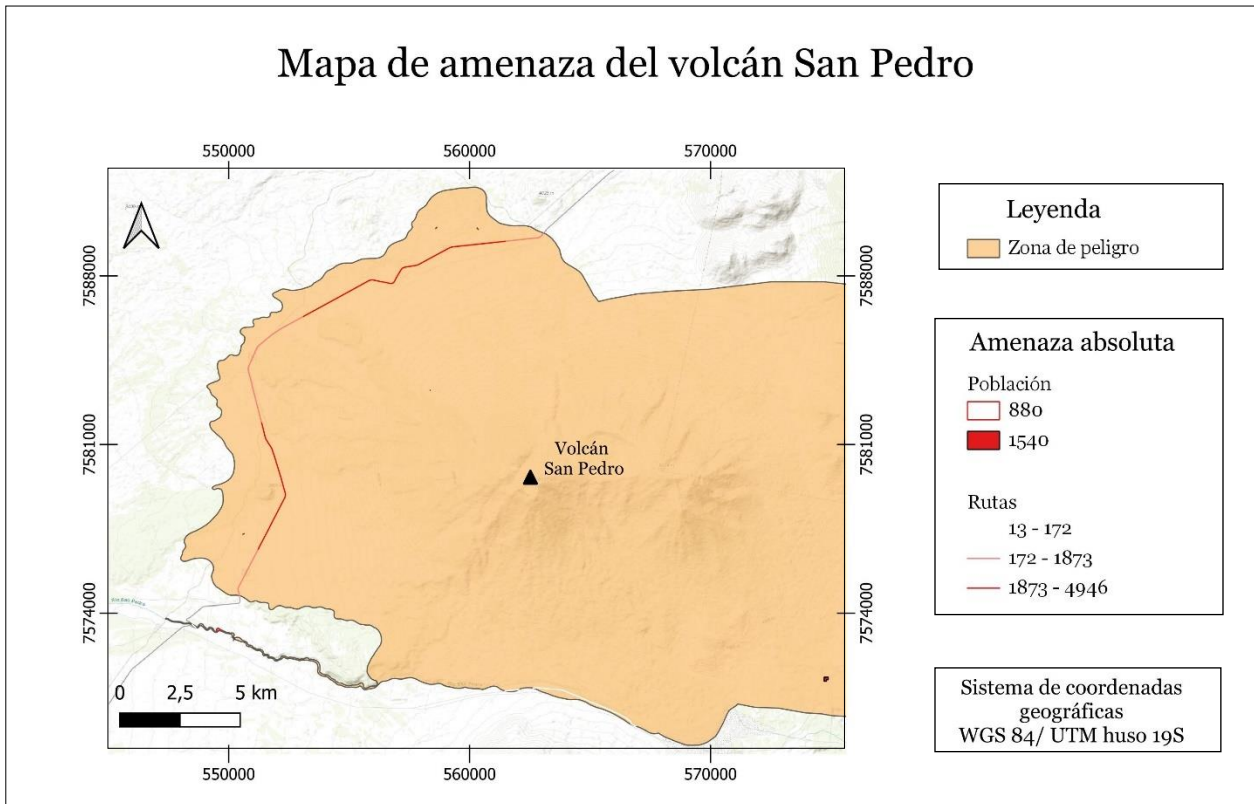


Figura 5.3. Mapa de amenaza del volcán San Pedro. Elaboración propia.

5.3. VOLCÁN TUPUNGATITO

La Tabla 5.4 muestra los valores de exposición y amenaza que fueron asignados para la población y las infraestructuras expuestas a las distintas zonas de peligro del volcán Tupungatito. El factor de recurrencia para este volcán es de 3,03, con respecto a la ecuación: $\ln(e + 18)$, siendo 18 el número total de erupciones de $VEI \geq 2$, o de $VEI < 2$ que presentan emisiones de lavas o flujos piroclásticos, registradas en los últimos 1800 años. En tanto que el factor de peligro propuesto por el SERNAGEOMIN corresponde a 13.

Tabla 5.4. Valores de exposición y amenaza de personas e infraestructuras del volcán Tupungatito.

Peligro	Zona de peligro		Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto	Total		
	Puntaje		10	20	60	100	170			
Exposición	Personas		0	3	48	197	5	253,04		
	Infraestructuras	Viviendas		0	0,01	0,1	0,36		0,01	
		Centros de educación		0	0	0	0		0	
		Centros de salud		0	0	0	0		0	
		Municipios		0	0	0	0		0	
		Bomberos		0	0	0	0		0	
		Carabineros		0	0	0	0		0	
		Hidroeléctricas		0	0	4	0		0	
		Aeródromos		0	0	0	0		0	
		Rutas		0	0,01	0,05	0,05		0	
		Puentes		0	0	0	0,1		0	
Amenaza absoluta	Factores	Recurrencia	3,03	Personas	0	181,86	8729,33	59711,02	2576,36	71204,46
		Infraestructuras		0	1,35	755,07	153,81	5,15		
	Peligro	Personas	13	0	780	37440	256100	11050	305395,24	
		Infraestructuras		0	5,79	3238,47	659,68	22,1		
Amenaza normalizada	Factores	Recurrencia	3,03	Personas	0	0,72	34,50	236,01	10,18	281,39
		Infraestructuras		0	0,29	160,94	32,78	1,10		
	Peligro	Personas	13	0	3,08	147,98	1012,25	43,68	1206,89	
		Infraestructuras		0	1,23	690,27	140,61	4,71		

Se evidencia que entre el 75-78% de las personas y viviendas están expuestas a la zona de alto peligro, cerca de un 20% son afectadas por la zona de moderado peligro y el resto se encuentra expuesto a los niveles de bajo y muy alto peligro. A pesar que estas últimas zonas registran puntajes de exposición similares, con respecto a las personas y viviendas, el nivel de muy alto peligro representa una mayor amenaza en comparación al nivel de bajo peligro, esto por el alto valor asignado a esta zona (170).

Como se observa en el mapa de amenaza del volcán Tupungatito (Figura 5.4.), las únicas infraestructuras críticas expuestas a alguna zona de peligro son: una hidroeléctrica, sometida a un moderado nivel de peligro; la ruta G-345, un camino regional, provincial, comunal y de acceso,

que está expuesto a las zonas de bajo, moderado y alto peligro (Anexo 8); y 2 puentes asociados a esta misma ruta y expuestos a un alto nivel de peligro. Por lo tanto, y a diferencia de lo que ocurre con la exposición de personas y viviendas, ~96% de las infraestructuras críticas expuestas, son susceptibles a ser afectadas por un moderado nivel de peligro.

Es importante destacar que no existen poblados aledaños que estén expuestos a algún nivel de peligro por parte del volcán Tupungatito.

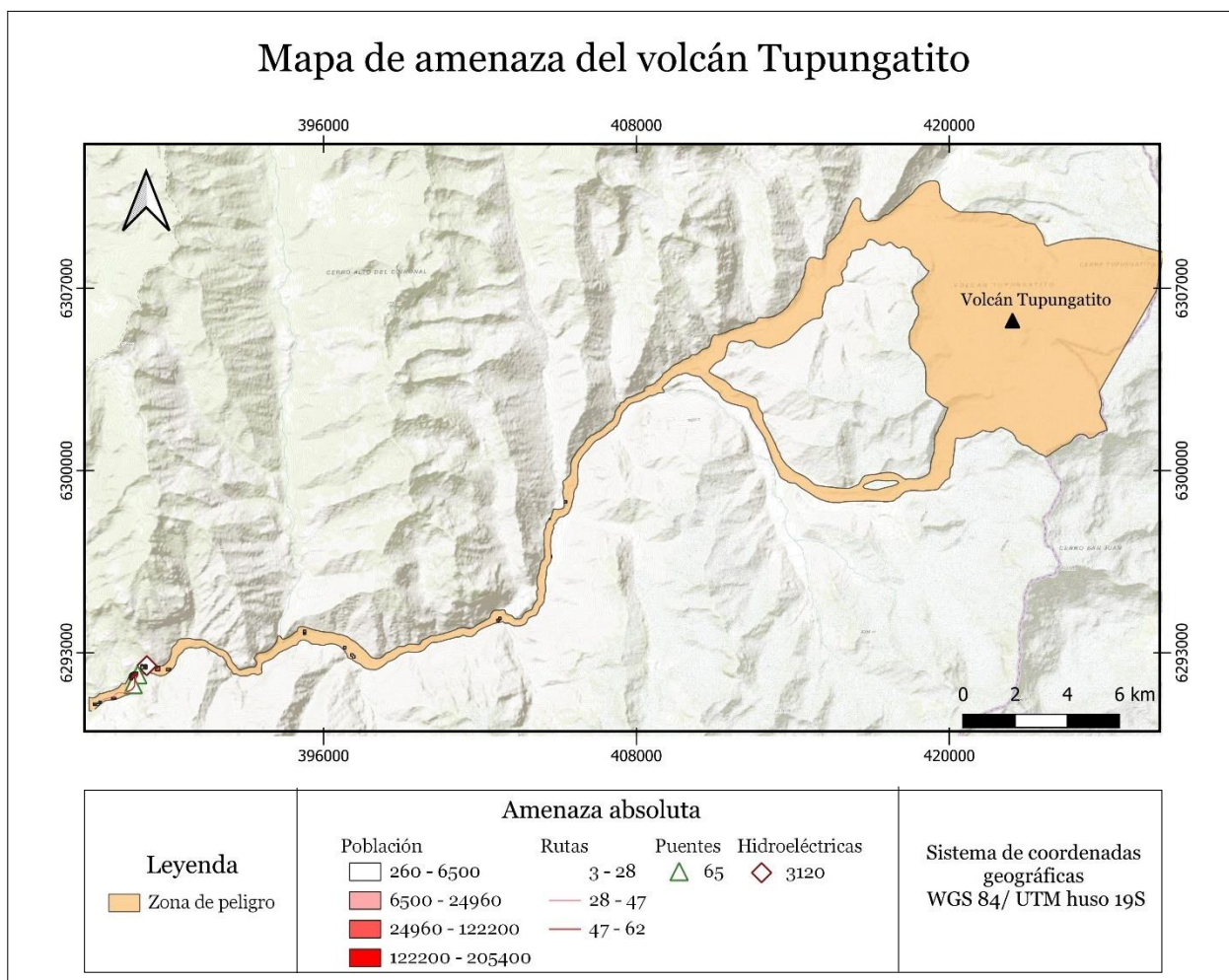


Figura 5.4. Mapa de amenaza del volcán Tupungatito. Elaboración propia.

5.4. COMPLEJO VOLCÁNICO PLANCHÓN-PETEROA

En la Tabla 5.5 se muestran los puntajes de amenaza de los elementos expuestos a las distintas zonas de peligro del complejo volcánico Planchón Peteroa. El factor de recurrencia corresponde a 2,69, en función de la ecuación: $\ln(e + 12)$, siendo 12 las erupciones consideradas según los criterios establecidos en la metodología. En tanto, el factor de peligro corresponde a 17,5, según el ranking de riesgo específico propuesto por el SERNAGEOMIN (2019).

Tabla 5.5. Valores de exposición y amenaza de personas e infraestructuras del complejo volcánico Planchón-Peteroa.

Peligro	Zona de peligro		Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto	Total	
	Puntaje		10	20	60	100	170		
Exposición	Personas		0	185	0	0	0	185,35	
	Infraestructuras	Viviendas	0	2,2	0	0	0		
		Centros de educación	0	0	0	0	0		
		Centros de salud	0	3	0	0	0		
		Municipios	0	0	0	0	0		
		Bomberos	0	2	0	0	0		
		Carabineros	0	2	0	0	0		
		Hidroeléctricas	0	0	0	0	0		
		Aeródromos	0	0	0	0	0		
		Rutas	0	1,90	0	0	0		
		Puentes	0	0,25	0	0	0		
		Amenaza absoluta	Factores	Recurrencia	Personas	2,69	0		9949,63
Infraestructuras	0				610,69		0	0	
Peligro	Personas		17,5	0	64750	0	0	64871,85	
	Infraestructuras			0	3974,23	0	0		
Amenaza normalizada	Factores	Recurrencia	Personas	2,69	0	53,78	0	0	53,78
			Infraestructuras		0	53,78	0	0	
	Peligro	Personas	17,5	0	350	0	0	350	
		Infraestructuras		0	350	0	0		

En la Tabla 5.5 se evidencia que la totalidad de activos evaluados (personas e infraestructuras) están expuestos a un bajo nivel de peligro, y como se observa en la Figura 5.5., se encuentran delimitados, en su gran mayoría, por el poblado Los Queñes, ubicado en el sector noroccidental de la zona de peligro de este complejo.

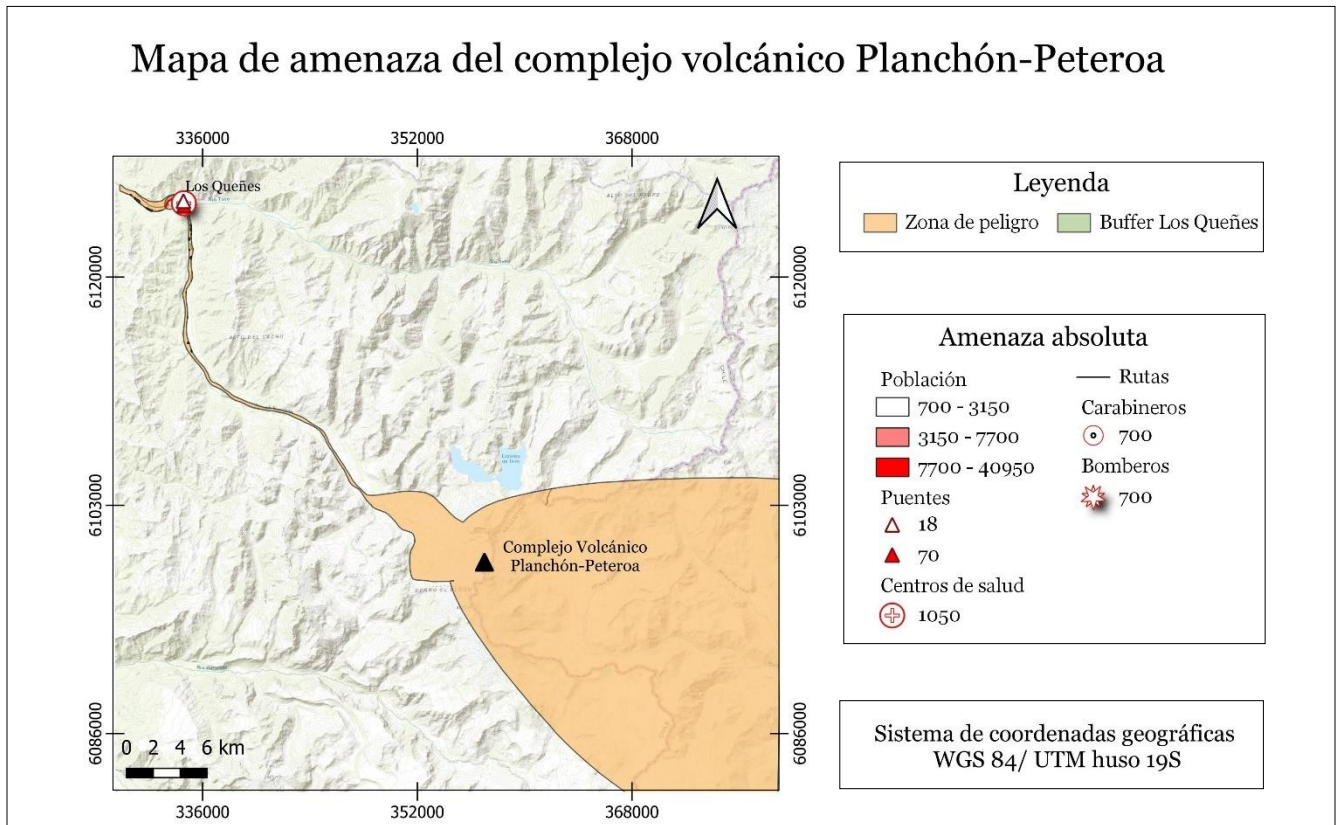


Figura 5.5. Mapa de amenaza del complejo volcánico Planchón-Peteroa. Elaboración propia.

5.4. 1. Los Queñes

El poblado Los Queñes ($35^{\circ}01'00''S$ $70^{\circ}48'00''W$), se encuentra localizado en el sector de la precordillera, en la región del Maule, a 36 km al oriente de la ciudad de Romeral y a 38 km al noroccidente del Complejo Volcánico Planchón-Peteroa. En este poblado se reconoce la Formación Abanico, constituida por lavas básicas a intermedias, rocas piroclásticas ácidas, e intercalaciones sedimentarias continentales (Informe Ambiental, Municipalidad Romeral), evidenciando la influencia que tienen los productos volcánicos del Complejo Volcánico Planchón-Peteroa sobre Los Queñes. Los resultados de exposición y amenaza obtenidos se resumen en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6. Valores de exposición y amenaza de personas e infraestructuras de Los Queñes.

Peligro	Zona de peligro		Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto	Total	
	Puntaje		10	20	60	100	170		
Exposición	Personas		0	140	0	0	0	140,33	
	Infraestructuras	Viviendas	0	1,75	0	0	0		
		Centros de educación	0	0	0	0	0		
		Centros de salud	0	3	0	0	0		
		Municipios	0	0	0	0	0		
		Bomberos	0	2	0	0	0		
		Carabineros	0	2	0	0	0		
		Hidroeléctricas	0	0	0	0	0		
		Aeródromos	0	0	0	0	0		
		Rutas	0	0,43	0	0	0		
		Calles	0	0,13	0	0	0		
		Puentes	0	0,25	0	0	0		
Amenaza absoluta	Factores	Recurrencia	Personas	2,69	0	7529,45	0	0	7547
			Infraestructuras		0	514,05	0	0	
	Peligro	Personas	17,5	0	49000	0	0	0	49114,06
		Infraestructuras		0	3345,35	0	0	0	
Amenaza normalizada	Factores	Recurrencia	Personas	2,69	0	31,37	0	0	31,41
			Infraestructuras		0	44,14	0	0	
	Peligro	Personas	17,5	0	204,17	0	0	0	204,40
		Infraestructuras		0	287,25	0	0	0	

Como se observa, la totalidad de personas e infraestructuras que se ubican en Los Queñes y que se encuentran expuestas a algún peligro impartido por el complejo volcánico Planchón-Peteroa, son amenazadas por un bajo nivel de peligro. Sin embargo, como se muestra en el mapa de amenaza de Los Queñes (Figura 5.6.), no toda la población e infraestructuras del poblado se encuentra amenazado. La población que se encuentra bajo amenaza corresponde al 58% de la población total de Los Queñes. En tanto que las rutas amenazadas, corresponden al 42% de las rutas totales del poblado. Dentro de ellas se destacan los caminos regionales principales (J-55 y J-25), los caminos regionales, provinciales, comunales y de acceso (J-577 y J-585), y las calles delimitadas manualmente.

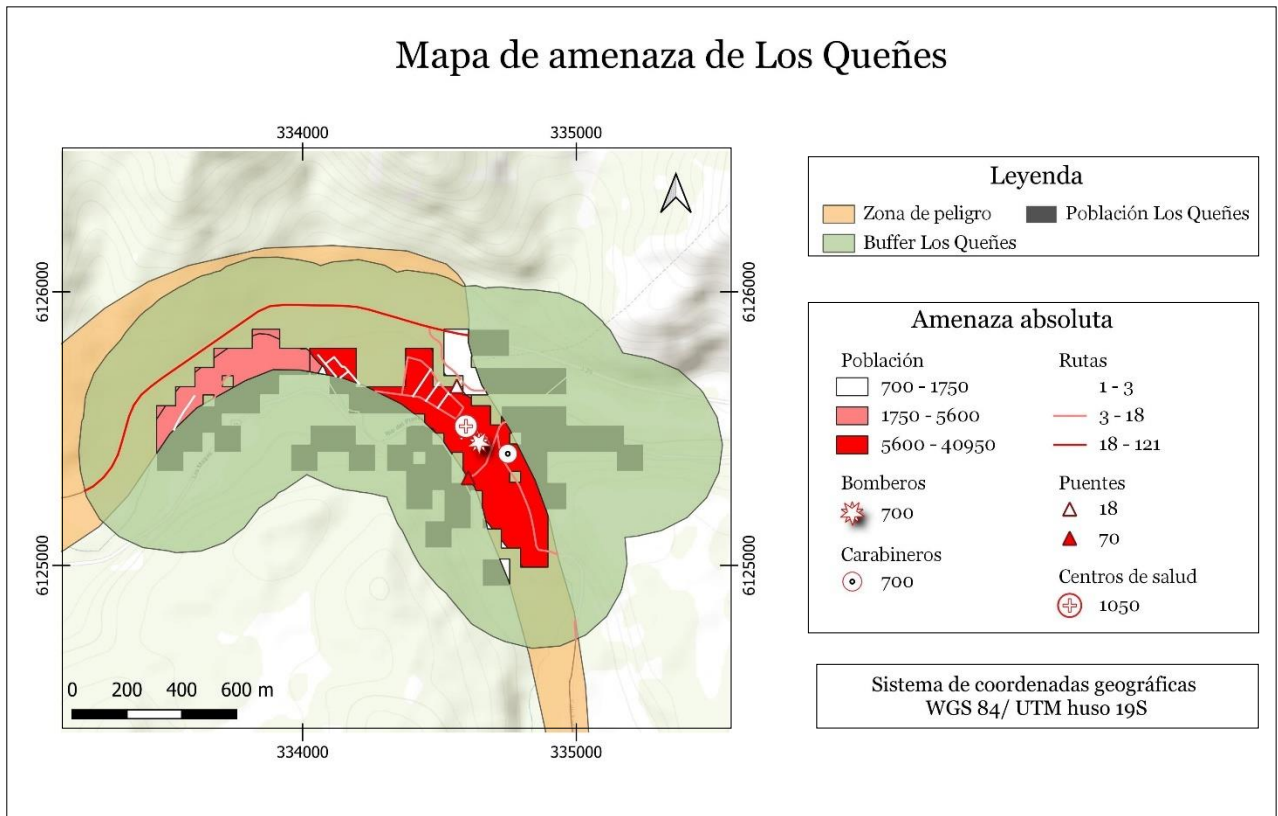


Figura 5.6. Mapa de amenaza del poblado Los Queñes. Elaboración propia.

5.5. COMPLEJO VOLCÁNICO CERRO AZUL-QUIZAPU

Si bien la erupción de 1932 del Volcán Quizapu es considerada una de las más grandes que ha sucedido en Sudamérica, no se registra ninguna persona o infraestructura en la zona de peligro del Complejo Volcánico Cerro Azul-Quizapu (Figura 3.5). Por lo tanto, el valor de amenaza volcánica de personas, viviendas e infraestructuras críticas (sociales, respuesta, energía y transporte) es 0, ya que no están expuestas a ningún peligro volcánico.

5.6. COMPLEJO VOLCÁNICO QUETRUPILLÁN

En la Tabla 5.7 se evidencia los valores de exposición y amenaza de la población e infraestructuras que se ubican en la zona de peligro del complejo volcánico Quetrupillán. Con respecto a la amenaza, en función de la ecuación: $\ln(e + 1)$, el factor de recurrencia corresponde a 1,31, que indica que solo se ha registrado 1 erupción en los últimos 1800 años. En tanto que el factor de peligro corresponde a 12, según el ranking de riesgo específico propuesto por el SERNAGEOMIN.

Tabla 5.7. Valores de exposición y amenaza de personas e infraestructuras del complejo volcánico Quetrupillán.

Peligro	Zona de peligro		Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto	Total		
	Puntaje		10	20	60	100	170			
Exposición	Personas		0	1982	1680	2817	0	6479,96		
	Infraestructuras	Viviendas	0	8,56	7,3	13,55	0			
		Centros de educación	0	14	10	7	0			
		Centros de salud	0	0	0	10	0			
		Municipios	0	4	0	0	0			
		Bomberos	0	2	0	2	0			
		Carabineros	0	2	0	2	0			
		Hidroeléctricas	0	0	0	0	0			
		Aeródromos	0	0	0	0	0			
		Rutas	0	4,81	6,39	11,35	0			
		Puentes	0	0,10	1,75	4,5	0			
Amenaza absoluta	Factores	Recurrencia	Personas	1,31	0	52057,69	132376,78	369945,82	0	554462,62
			Infraestructuras		0	931,53	2004,93	6618,26	0	
	Peligro	Personas	12	0	475680	1209600	3380400	0	5066432,31	
		Infraestructuras		0	8511,91	18320,14	60474,72	0		
Amenaza normalizada	Factores	Recurrencia	Personas	1,31	0	8,03	20,43	57,10	0	85,57
			Infraestructuras		0	8,37	18,01	59,46	0	
	Peligro	Personas	12	0	73,42	186,70	521,75	0	781,86	
		Infraestructuras		0	76,47	164,59	543,32	0		

La zona de alto peligro concentra ~45% de la población, viviendas e infraestructuras críticas expuestas a los peligros del complejo volcánico Quetrupillán. Por su parte la zona de bajo peligro concentra ~30% de los activos expuestos y la zona de moderado peligro contiene ~25% restante.

La infraestructura crítica con mayor valor de exposición corresponde a los centros educacionales, los cuales son susceptibles a ser amenazados por los tres niveles de peligro (bajo, moderado y alto). Le siguen los bomberos, carabineros y municipios, todos con el mismo valor de exposición.

En tanto, las infraestructuras de transporte, que consisten en 19 rutas y 44 puentes, están expuestas a las zonas de bajo, moderado y alto peligro, siendo este último nivel el que concentra

el mayor valor de exposición y amenaza de rutas y puentes. Como se observa en el mapa de amenaza del complejo volcánico Quetrupillán (Figura 5.7.), la ruta internacional 199 CH, al igual que la mayoría de los activos evaluados, se distribuye por todo el sector nororiental y gran parte del sector oriental de la zona de peligro del Complejo, viéndose amenazada por los tres niveles de peligro (bajo, moderado y alto) y considerándose la ruta con mayor valor de exposición y amenaza de este Complejo. Otras rutas que también predominan por su extensión en el mapa de amenaza y por su exposición a los tres niveles de peligro, son los caminos regionales, provinciales, comunales y de acceso S-941 y S-947 (Anexo 8).

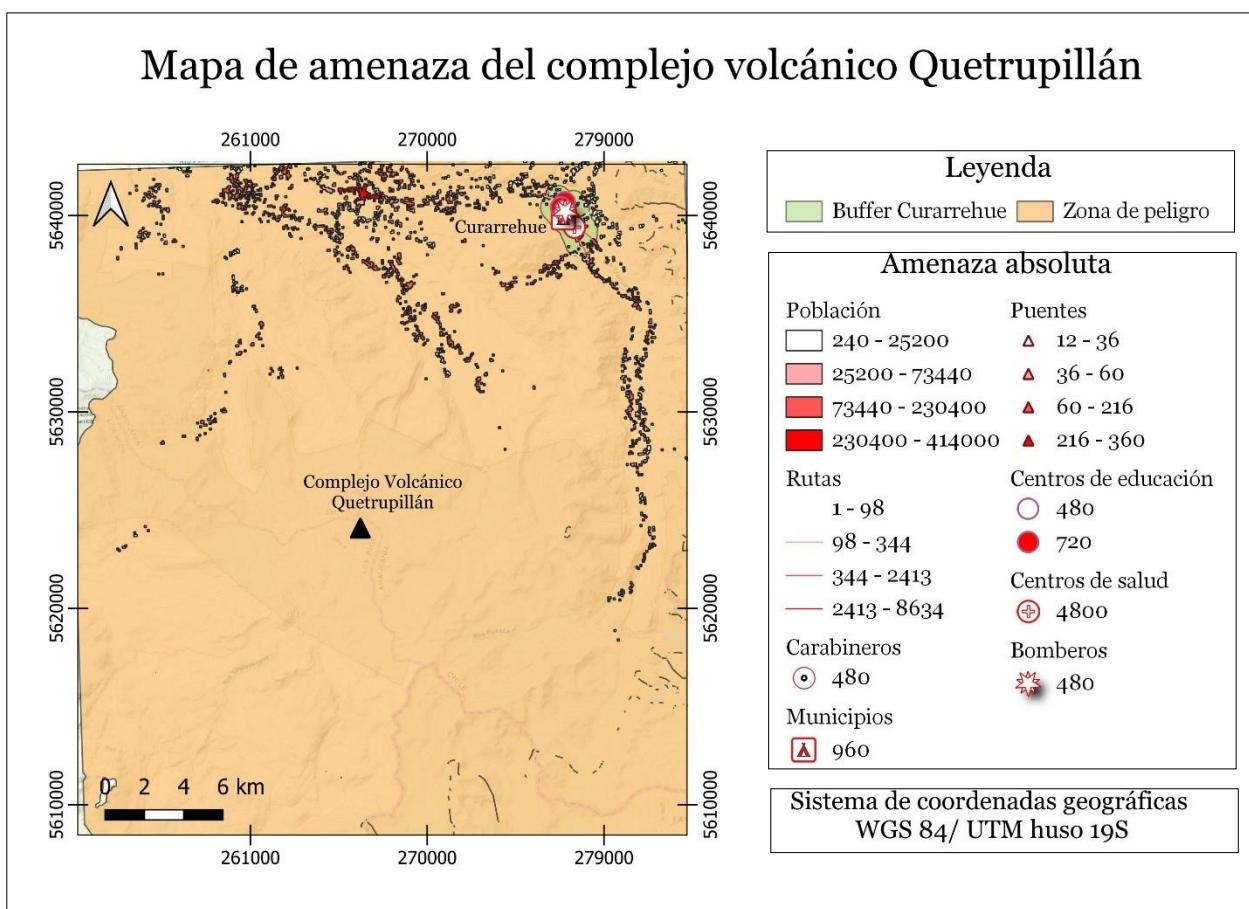


Figura 5.7. Mapa de amenaza del complejo volcánico Quetrupillán. Elaboración propia.

5.6. 1. Curarrehue

Curarrehue (39°22'53"S 71° 32'00' W) corresponde al poblado expuesto a los peligros del Complejo Volcánico Quetrupillán, ubicándose a unos 18 km al NNE de este, en la región de La Araucanía (Brahm, 2017). Este poblado se edifica sobre un conjunto de rocas volcánicas,

volcanosedimentarias y sedimentarias (Moreno & Lara, 2008). En la Tabla 5.8 se muestran los valores de exposición y amenaza de los activos ubicados en Curarrehue, los que se encuentran afectados por las zonas de bajo, moderado y alto peligro del complejo volcánico Quetrupillán.

Tabla 5.8. Valores de exposición y amenaza de personas e infraestructuras de Curarrehue.

Peligro	Zona de peligro			Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto	Total	
	Puntaje			10	20	60	100	170		
Exposición	Personas			0	1313	74	896	0	2283,22	
	Infraestructuras	Viviendas			0	5,72	0,25	3,89		0
		Centros de educación			0	8	0	0		0
		Centros de salud			0	0	0	4		0
		Municipios			0	4	0	0		0
		Bomberos			0	2	0	0		0
		Carabineros			0	2	0	0		0
		Hidroeléctricas			0	0	0	0		0
		Aeródromos			0	0	0	0		0
		Rutas			0	0,57	0,20	0,52		0
		Calles			0	0,18	0	0,09		0
		Puentes			0	0	0	0,05		0
Amenaza absoluta	Factores	Recurrencia	Personas	1,31	0	34486,25	5830,88	117668,25	0	157995,06
			Infraestructuras		0	590,09	35,78	1122,84	0	
	Peligro	Personas	12	0	315120	53280	1075200	0	1443688,43	
		Infraestructuras		0	5391,94	326,98	10260,01	0		
Amenaza normalizada	Factores	Recurrencia	Personas	1,31	0	15,11	2,55	51,54	0	69,20
			Infraestructuras		0	18,75	1,14	36	0	
	Peligro	Personas	12	0	138,03	23,34	470,96	0	632,30	
		Infraestructuras		0	171,33	10,39	326,02	0		

A diferencia del complejo volcánico Quetrupillán, en Curarrehue la mayor proporción de personas e infraestructuras expuestas (58% y 71% respectivamente), se distribuyen en la zona de bajo peligro. En tanto que la zona de alto peligro concentra el 40% de las personas expuestas, y el 27% de las infraestructuras expuestas.

La totalidad de los activos ubicados en Curarrehue se encuentran expuestos a la zona de peligro del complejo volcánico Quetrupillán, como se ilustra en el mapa de amenaza de Curarrehue (Figura 5.8.). Donde nuevamente se destaca la ruta internacional 199 CH por tener los valores de exposición y amenaza más elevados. Esto se debe a que esta ruta, además de atravesar la totalidad del poblado de Curarrehue, se encuentra amenazada por los niveles de bajo, moderado y alto peligro del complejo volcánico Quetrupillán.

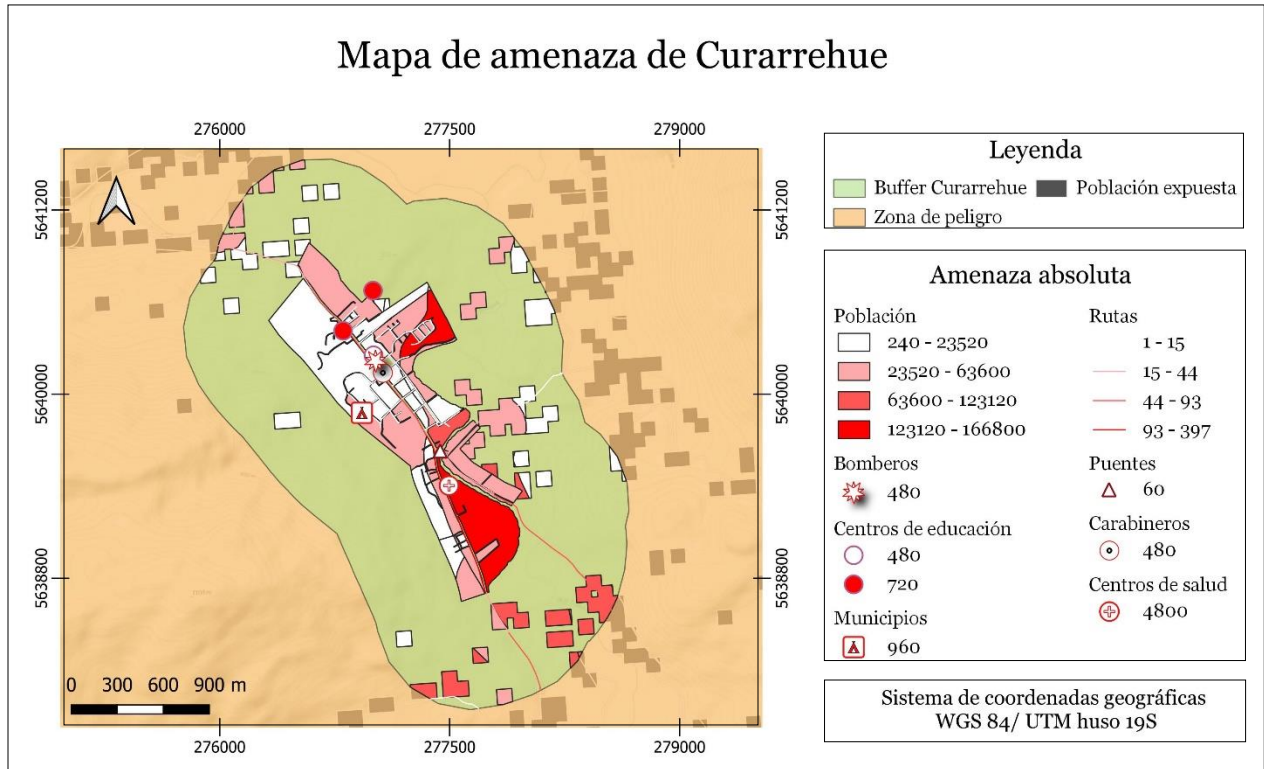


Figura 5.8. Mapa de amenaza del poblado Curarrehue. Elaboración propia.

5.7. VOLCÁN OSORNO

En la Tabla 5.9 se muestran los valores de exposición y amenaza de los activos propensos a ser afectados por algún nivel de peligro del volcán Osorno. Para este volcán, el factor de recurrencia obtenido por medio de la expresión $\ln(e + 4)$, es 1,9, que representa un total de 4 erupciones registradas en los último 1800 años, según los criterios planteados en la metodología. En tanto, el factor de peligro proporcionado por el SERNAGEOMIN corresponde a 20,5.

Tabla 5.9. Valores de exposición y amenaza de personas e infraestructuras del volcán Osorno.

Peligro	Zona de peligro		Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto	Total		
	Puntaje		10	20	60	100	170			
Exposición	Personas		0	598	180	1001	0	1779,78		
	Infraestructuras	Viviendas	0	3,14	1,12	6	0			
		Centros de educación	0	2	5	5	0			
		Centros de salud	0	0	3	6	0			
		Municipios	0	0	0	0	0			
		Bomberos	0	0	0	2	0			
		Carabineros	0	0	2	2	0			
		Hidroeléctricas	0	0	0	0	0			
		Aeródromos	0	0	0	0	0			
		Rutas	0	2,26	4,93	6,13	0			
		Puentes	0	0,3	0,3	1,55	0			
Amenaza absoluta	Factores	Recurrencia	1,90	Personas	0	22781,80	20572,19	190673,73	0	234151,94
		Infraestructuras		0	293,49	1868,88	5463,95087	0		
	Peligro	Personas	20,5	0	245180	221400	2052050	0	2519966,95	
		Infraestructuras		0	3158,56	20113,11	58803,59	0		
Amenaza normalizada	Factores	Recurrencia	1,90	Personas	0	12,81	11,56	107,18	0	131,56
		Infraestructuras		0	5,56	35,44	103,60	0		
	Peligro	Personas	20,5	0	137,82	124,45	1153,49	0	1415,89	
		Infraestructuras		0	59,89	381,36	1114,96	0		

Como bien se observa, la mayor parte de la población y viviendas expuestas a peligros volcánicos se concentran en la zona de alto peligro (~57%), le sigue el nivel de bajo peligro (~33%), y finalmente la zona de moderado peligro (~10%). En tanto, la mayor proporción de infraestructuras críticas expuestas a peligros por parte del volcán Osorno se ubican en la zona de alto peligro (~54%), le sigue la zona de moderado peligro (~36%) y finalmente el bajo nivel de peligro (~10%).

Como se observa en el mapa de amenaza del volcán Osorno (Figura 5.9.), la mayoría de los activos expuestos se ubican en el sector occidental de la zona de peligro del volcán. Donde las rutas son consideradas las infraestructuras que tienen los valores de exposición y amenaza más altos en comparación al resto. Dentro de ellas, se destaca la ruta internacional 225-CH, que une el poblado

de Ensenada con el lago Todos Los Santos y se encuentra amenazada por las zonas de bajo, moderado y alto peligro del volcán Osorno (Anexo 8), por lo que se le asigna los valores de exposición y amenaza más alto entre las rutas del volcán. Le sigue el camino regional principal U-99-V, que conecta los poblados de Ensenada y Las Cascadas, y que también se encuentra bajo amenaza por los tres niveles de peligro. Ambas rutas tienen puentes asociados a su extensión: seis puentes están contenidos en el camino regional principal U-99-V, y uno se asocia a la ruta internacional 225-CH.

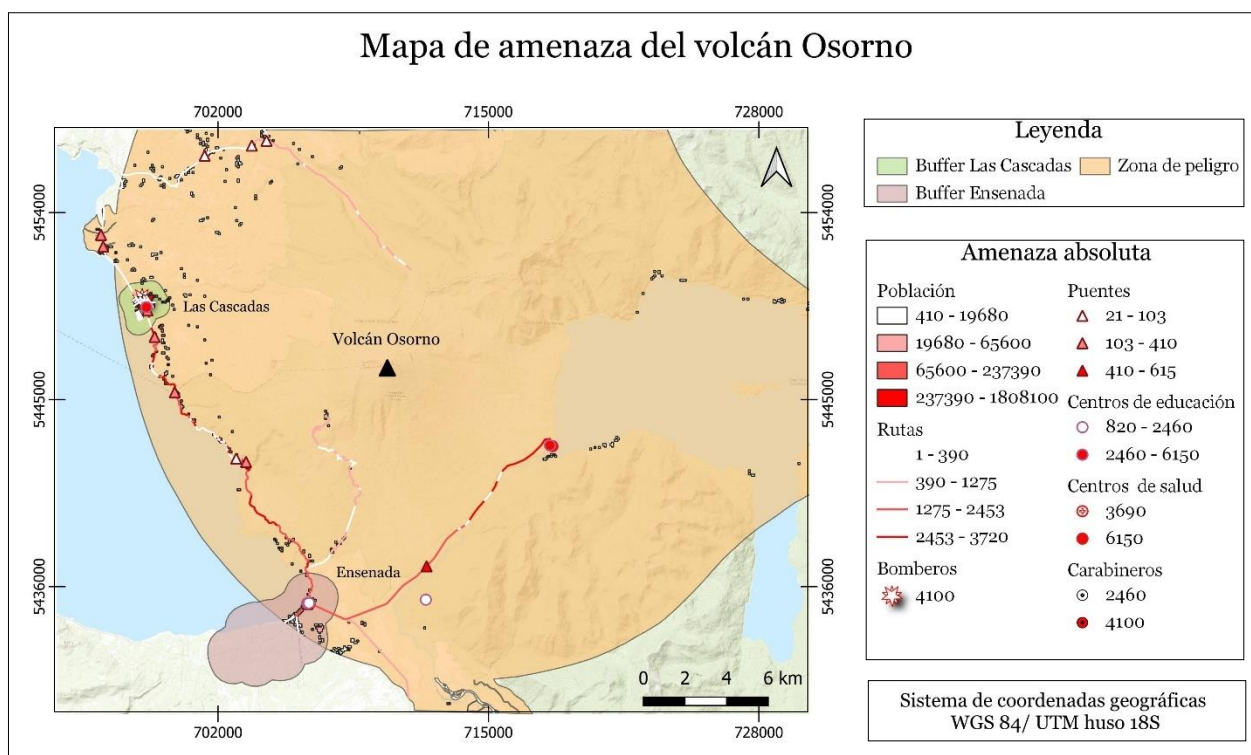


Figura 5.9. Mapa de amenaza del volcán Osorno. Elaboración propia.

5.7. 1. Las Cascadas

Dentro de los poblados amenazados por los peligros impartidos por el volcán Osorno, se encuentra la localidad de Las Cascadas ($41^{\circ}04'44''S$ $72^{\circ}38'14''W$), la que está ubicada al oeste del Lago Llanquihue en la región de Los Lagos, a 10 km al NW del cráter del volcán Osorno (Cari & Muñoz, 2006). Los lahares representan el mayor peligro al que está expuesto este poblado (Moreno, 1999a), ya que se encuentra en la ruta de los flujos laháricos que descienden hasta el lago Llanquihue, donde se depositan y forman un abanico lahárico de $2,2 \text{ km}^2$ de superficie (Cari & Muñoz, 2006). Una erupción en época estival podría producir una descarga de lahares de 80×10^6

m^3 en verano, mientras que en invierno el volumen se duplicaría (Moreno *et al.*, 1985). En la Tabla 5.10 se muestran los valores de exposición y amenaza de los activos afectados según el nivel de peligro al que están sometidos.

Tabla 5.10. Valores de exposición y amenaza de personas e infraestructuras de Las Cascadas.

Peligro	Zona de peligro		Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto	Total		
	Puntaje		10	20	60	100	170			
Exposición	Personas		0	64	0	834	0	898,14		
	Infraestructuras	Viviendas	0	0,35	0	4,74	0			
		Centros de educación	0	0	0	3	0			
		Centros de salud	0	0	0	3	0			
		Municipios	0	0	0	0	0			
		Bomberos	0	0	0	2	0			
		Carabineros	0	0	0	2	0			
		Hidroeléctricas	0	0	0	0	0			
		Aeródromos	0	0	0	0	0			
		Rutas	0	0,11	0,05	0,32	0			
		Calles	0	0,03	0	0,28	0			
		Puentes	0	0	0	0,2	0			
		Amenaza absoluta	Factores	Recurrencia	Personas	1,90	0		2438,19	0
Infraestructuras	0				18,68		6,20	2959,55		
Peligro	Personas		20,5	0	26240	0	1709700	0	1736237,11	
	Infraestructuras			0	201,00	66,70	31850,96			
Amenaza normalizada	Factores	Recurrencia	Personas	1,9	0	2,72	0	176,91	0	179,62
			Infraestructuras		0	1,16	0,39	184,03		
	Peligro	Personas	20,5	0	29,22	0	1903,90	0	1933,14	
		Infraestructuras		0	12,50	4,15	1980,59			

Como se observa, tanto la población como las viviendas de Las Cascadas son afectadas por las zonas de bajo y alto peligro del volcán Osorno, siendo este último nivel en el que se ubica el 93% de las personas y viviendas expuestas a los peligros volcánicos. En tanto que el 7% restante se encuentran amenazadas por la zona de bajo peligro.

Por su parte, el 98% de las infraestructuras críticas expuestas a los peligros del volcán Osorno se ubican en la zona de alto peligro, y el 2% restante se ubican entre las zonas de moderado y bajo peligro. Tanto las infraestructuras críticas sociales (centros de educación y de salud), como las de respuesta (bomberos y carabineros) del poblado Las Cascadas, se encuentran amenazadas solo por la zona de alto peligro. En cambio, las infraestructuras de transporte se encuentran afectadas por zonas de bajo, moderado y alto peligro. Dentro de ellas se destaca el camino regional principal U-99-V, que atraviesa todo el poblado de Las Cascadas (Figura 5.10.) y que se encuentra amenazado por los tres niveles de peligro impartidos por el volcán Osorno. Además, en esta ruta se ubica un puente que se encuentra amenazado por la zona de alto peligro. Es importante destacar que la totalidad de los activos ubicados en el poblado de Las Cascadas se encuentran bajo amenaza volcánica.

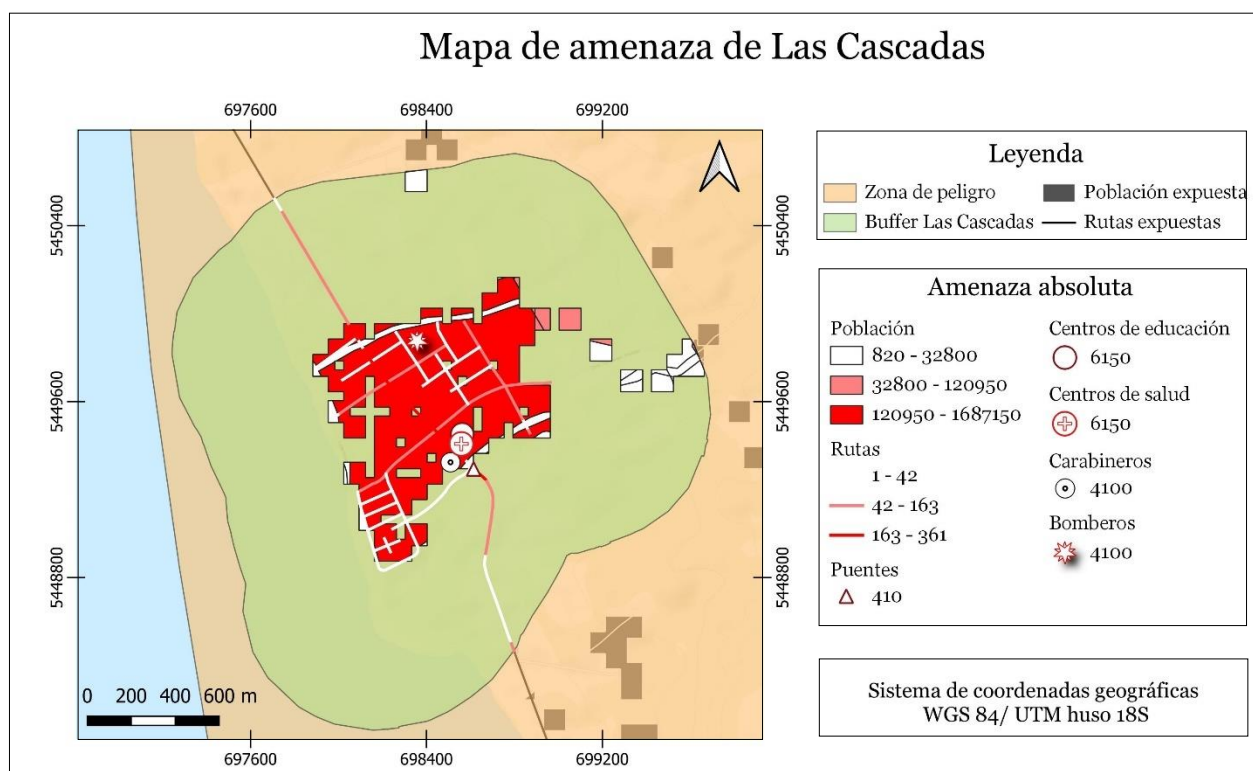


Figura 5.10. Mapa de amenaza del poblado Las Cascadas. Elaboración propia.

5.7. 2. Ensenada

Otro poblado amenazado por el volcán Osorno es Ensenada ($41^{\circ}12'29''S$ $72^{\circ}32'18''W$), una localidad rural ubicada en el punto más oriental del lago Llanquihue, a 12 km al sur del cono volcánico. Los peligros del volcán Osorno afectan al sector centro norte de Ensenada, ya que se

encuentra dominado por una alta probabilidad de flujos de lava provenientes de los centros adventicios de la ladera suroeste del volcán Osorno, y a su vez, por una moderada probabilidad de lahares. En la Tabla 5.11 se muestran los valores de exposición y amenaza de los activos ubicados en Ensenada que son susceptibles a ser afectados por posibles peligros volcánicos.

Tabla 5.11. Valores de exposición y amenaza de personas e infraestructuras de Ensenada afectadas por los peligros del volcán Osorno.

Peligro	Zona de peligro		Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto	Total	
	Puntaje		10	20	60	100	170		
Exposición	Personas		0	72	74	0	0	146,76	
	Infraestructuras	Viviendas	0	0,46	0,5	0	0		
		Centros de educación	0	0	5	0	0		
		Centros de salud	0	0	3	0	0		
		Municipios	0	0	0	0	0		
		Bomberos	0	0	0	0	0		
		Carabineros	0	0	2	0	0		
		Hidroeléctricas	0	0	0	0	0		
		Aeródromos	0	0	0	0	0		
		Rutas	0	0,22	3,26	0	0		
		Calles	0	0,11	0,10	0	0		
		Puentes	0	0	0,3	0	0		
Amenaza absoluta	Factores	Recurrencia	Personas	1,9	0	2742,96	8457,46	0	11321,08
			Infraestructuras		0	30,27	1618,22	0	
	Peligro	Personas	20,5	0	29520	91020	0	121838,59	
		Infraestructuras		0	325,79	17415,39	0		0
Amenaza normalizada	Factores	Recurrencia	Personas	1,9	0	3,34	10,29	0	13,77
			Infraestructuras		0	1,21	64,47	0	
	Peligro	Personas	20,5	0	35,91	110,73	0	148,15	
		Infraestructuras		0	12,98	693,85	0		0

Como se observa, tanto las personas, viviendas e infraestructuras críticas del poblado de Ensenada que se encuentran expuestas a los peligros impartidos por el volcán Osorno, son amenazadas por los niveles de bajo y moderado peligro de este volcán. Siendo este último nivel en el que se ubican los activos evaluados con valores de exposición y amenaza más elevados.

La totalidad de infraestructuras sociales (centros de educación y de salud) y de respuesta (carabineros) expuestas, se encuentran amenazadas por la zona de moderado peligro. En tanto que las infraestructuras de transporte se encuentran afectadas por la zona de bajo y moderado peligro del volcán Osorno. Donde la ruta con mayor valor de exposición y amenaza corresponde a la ruta internacional 225-CH, esto debido a su extensión en el poblado y a que se encuentra amenazada por un moderado nivel de peligro, teniendo además un puente asociado y amenazado por la misma zona de peligro. La ruta que le sigue en cuanto a su valor de exposición y amenaza es el camino regional principal U-99-V, el que también se encuentra amenazado por un moderado nivel de peligro. Como se observa en el mapa de amenaza de Ensenada (Figura 5.11.), solo un ~20% de la población y viviendas de Ensenada se encuentran amenazadas por los peligros derivados del volcán Osorno. En tanto, el ~70% de las infraestructuras críticas del poblado se encuentran amenazadas por este volcán.

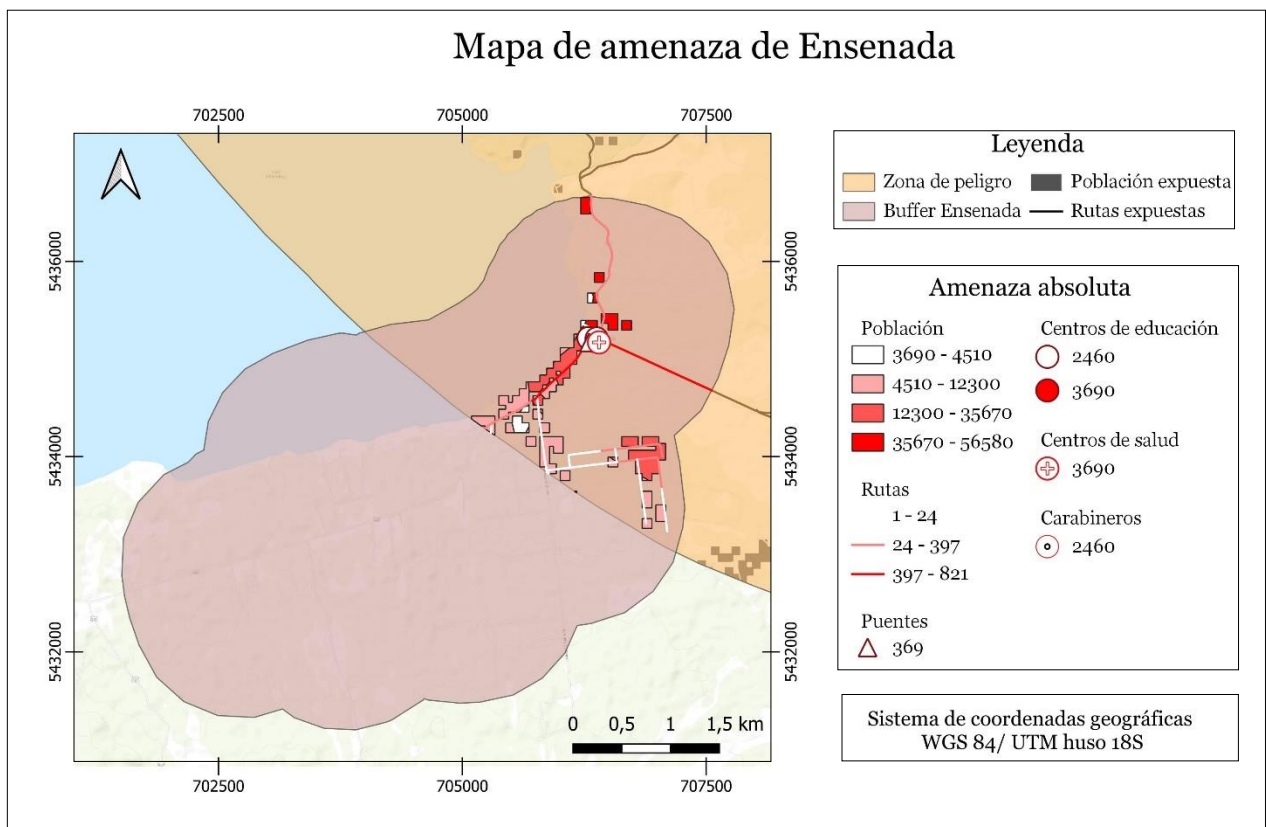


Figura 5.11. Mapa de amenaza del poblado Ensenada ante los peligros del volcán Osorno. Elaboración propia.

5.8. VOLCÁN CALBUCO

En la Tabla 5.12 se muestra la exposición de la población, viviendas e infraestructuras críticas a las distintas zonas de peligro del volcán Calbuco. Con respecto a la amenaza, el factor de recurrencia corresponde a 2,37, en función de la ecuación: $\ln(e + 8)$, que indica que se han registrado 8 erupciones con depósitos de flujos de VEI ≥ 1 en los últimos 1800 años. En tanto que el factor de peligro corresponde a 21, según el ranking de riesgo específico del SERNAGEOMIN.

Tabla 5.12. Valores de exposición y amenaza de personas e infraestructuras del volcán Calbuco.

Peligro	Zona de peligro		Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto	Total		
	Puntaje		10	20	60	100	170			
Exposición	Personas		0	1899	699	783	21	3403,42		
	Infraestructuras	Viviendas	0	12,16	4,18	5,32	0,27			
		Centros de educación	0	16	2	2	0			
		Centros de salud	0	9	6	0	0			
		Municipios	0	0	0	0	0			
		Bomberos	0	0	0	0	0			
		Carabineros	0	2	0	2	0			
		Hidroeléctricas	0	0	0	3	4			
		Aeródromos	0	0	3	0	0			
		Rutas	0	13,73	3,16	5,73	0,08			
		Puentes	0	2,40	0,3	2	0			
Amenaza absoluta	Factores	Recurrencia	2,37	Personas	0	90086,69	99479,62	185723,75	8467,86	383938,83
		Infraestructuras		0	2622,81	2653,01	4754,80	1753,98		
	Peligro	Personas	21,0	0	797580	880740	1644300	74970	3399191,60	
		Infraestructuras		0	23220,96	23488,39	42096,53	15528,77		
Amenaza normalizada	Factores	Recurrencia	2,37	Personas	0	26,48	29,24	54,59	2,49	112,81
		Infraestructuras		0	27	26,98	48,36	17,84		
	Peligro	Personas	21	0	234,44	258,89	483,33	22,04	998,76	
		Infraestructuras		0	236,16	238,88	428,14	157,93		

Como se observa, el mayor puntaje de exposición de personas y viviendas se concentra en las zonas de bajo peligro, representando ~55% del conjunto, el 23% se ubica en la zona de alto peligro, el 21% en la zona de moderado, y el 1% restante en la zona de muy alto peligro. Las infraestructuras críticas siguen la misma tendencia que las personas y viviendas, donde el nivel de bajo peligro es

en el que se ubica el ~57% de las infraestructuras críticas expuestas, le sigue la zona de moderado y alto peligro, donde cada una concentra el ~19% de las infraestructuras críticas, y finalmente en la zona de muy alto peligro se ubica el 5% de las infraestructuras críticas expuestas restantes. Sin embargo, a nivel de amenaza, la zona de alto peligro es la que registra los valores más elevados, le sigue el nivel moderado peligro, luego el de bajo peligro y finalmente, la zona de muy alto peligro.

Con respecto a las infraestructuras críticas, son los colegios los que evidencian el mayor valor de exposición, siendo afectados por tres niveles de peligro (bajo, moderado y alto), le siguen los centros de salud, las centrales hidroeléctricas, que corresponden al único activo amenazado por la zona de muy alto peligro, y por último carabineros.

Como se observa en el mapa de amenaza del volcán Calbuco (Figura 5.12), la mayoría de los activos expuestos se localizan dentro de los buffers que delimitan los poblados de Ensenada, Colonia Río Sur, Río Blanco-Colorado, Correntoso y Ralún, concentrándose en el sector occidental de la zona de peligro principalmente. Sin embargo, en el sector oriental también se identifican activos, como la población e infraestructuras de Ralún, poblado ubicado en el sector suroriental de la zona de peligro del volcán Calbuco, y el camino regional principal V-69 que conecta este poblado con Ensenada, y que se encuentra amenazado por tres niveles de peligro (bajo, moderado y alto), al igual que la ruta internacional 225-CH y el camino regional principal V-65 (Anexo 8), siendo esta última igual de importante porque conecta los poblados de Correntoso y Río Blanco-Colorado.

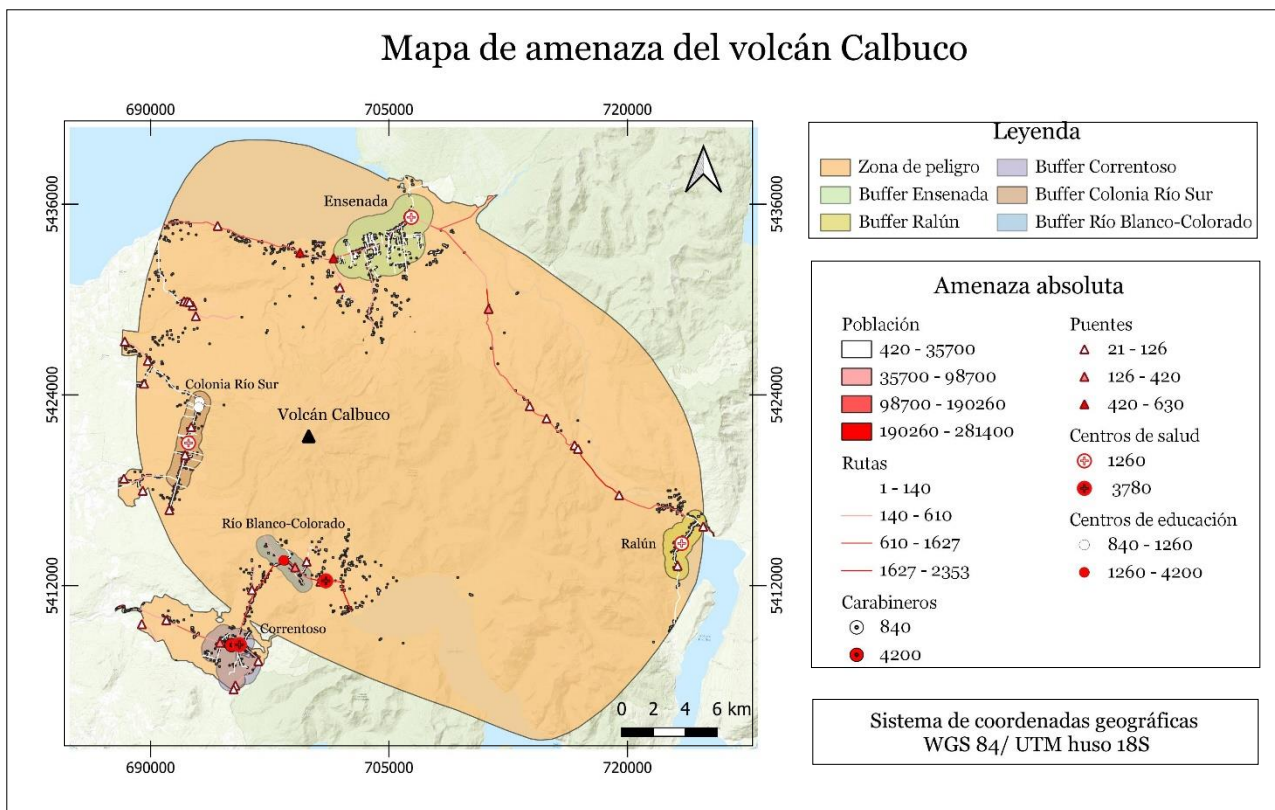


Figura 5.12. Mapa de amenaza del volcán Calbuco. Elaboración propia.

5.8. 1. Ensenada

Uno de los poblados expuestos a los peligros del volcán Calbuco corresponde a Ensenada ($41^{\circ}12'29''S$ $72^{\circ}32'18''W$), el cual además se encuentra amenazada por el volcán Osorno, como se mencionó anteriormente. Esta localidad se ubica 14 km al norte del volcán Calbuco, sobre un abanico lahárico distal de este volcán, generado en las erupciones de 1893-95-1961 (Mella *et al.*, 2016). Bajo este contexto, la amenaza la constituyen los lahares, aumentando su peligrosidad hacia el sur de esta localidad. Además, en la erupción subpliniana del 2015, se elevaron columnas eruptivas a 13 y 18 km de altura sobre el nivel del cráter, afectando con caída de ceniza a este poblado (Cárdenas *et al.*, 2018). En la Tabla 5.13 se muestran los valores de exposición y amenaza de la población, viviendas e infraestructuras críticas de Ensenada susceptibles a ser afectadas por peligros provenientes del volcán Calbuco.

Tabla 5.13. Valores de exposición y amenaza de personas e infraestructuras de Ensenada afectadas por los peligros del volcán Calbuco.

Peligro	Zona de peligro		Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto	Total		
	Puntaje		10	20	60	100	170			
Exposición	Personas		0	459	67	296	0	822,48		
	Infraestructuras	Viviendas	0	3,28	0,39	1,62	0			
		Centros de educación	0	5	0	0	0			
		Centros de salud	0	3	0	0	0			
		Municipios	0	0	0	0	0			
		Bomberos	0	0	0	0	0			
		Carabineros	0	2	0	0	0			
		Hidroeléctricas	0	0	0	0	0			
		Aeródromos	0	0	0	0	0			
		Rutas	0	5,96	3,81	1,43	0			
		Calles	0	0,71	0,17	0,30	0			
		Puentes	0	0,3	0	0	0			
		Amenaza absoluta	Factores	Recurrencia	Personas	2,37	0		21774,5	9535,24
Infraestructuras	0				960,749		622,74	794,69	0	
Peligro	Personas		21	0	192780	84420	621600	0	899046,58	
	Infraestructuras			0	8505,97	5513,41	7035,77	0		
Amenaza normalizada	Factores	Recurrencia	Personas	2,37	0	26,49	11,60	85,41	0	123,47
			Infraestructuras		0	34,34	22,26	28,40	0	
	Peligro	Personas	21	0	234,53	102,70	756,20	0	1093,10	
		Infraestructuras		0	304,02	197,06	251,47	0		

Se observa que la mayor proporción de activos de Ensenada expuestos a las zonas de peligro del volcán Calbuco, se encuentran amenazados por el bajo nivel de peligro, correspondiendo a ~56% de las personas y ~81% de las infraestructuras. En tanto, ~36% de las personas expuestas y ~13% de las infraestructuras expuestas se encuentran afectadas por la zona de alto peligro. Finalmente, ~8% de personas y ~6% de infraestructuras expuestas, se ubican en la zona de moderado peligro.

La totalidad de infraestructuras críticas sociales (centros de salud y educación) y de respuesta (carabineros) de Ensenada están amenazadas por un bajo nivel de peligro del volcán Calbuco. En tanto que las infraestructuras críticas de transporte están expuestas a los tres niveles de peligro: alto, moderado y bajo, siendo este último en el que se localizan las rutas, calles y puentes que presenta el valor de exposición más elevado. Como se observa en el mapa de amenaza de Ensenada (Figura 5.13.), la ruta internacional 225-CH resalta entre las demás por su gran extensión a lo largo

del poblado, y por encontrarse afectada por los tres niveles de peligro del volcán Calbuco, reflejando su elevado valor de amenaza. Además, en esta ruta se encuentra el único puente de Ensenada, el que está amenazado por un bajo nivel de peligro por parte del volcán Calbuco.

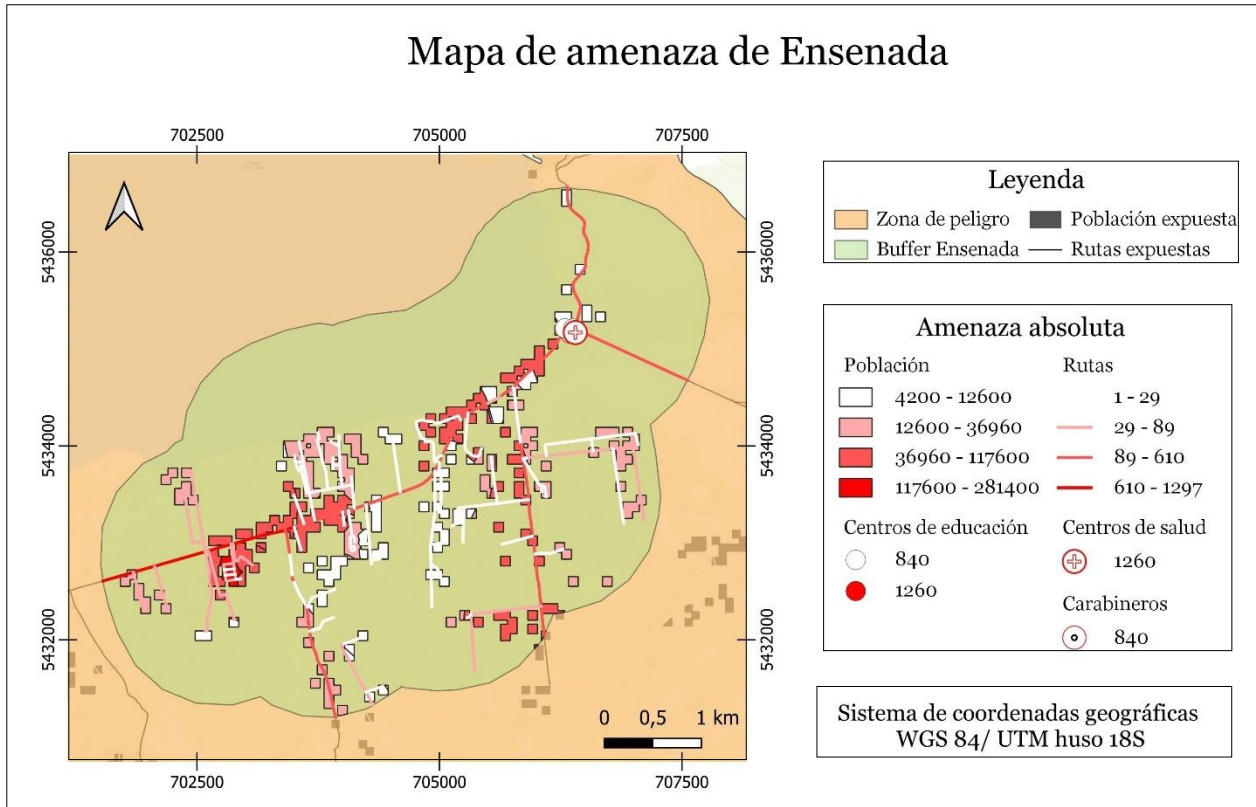


Figura 5.13. Mapa de amenaza del poblado Ensenada ante los peligros del volcán Calbuco. Elaboración propia.

5.8. 2. Ralún

Otro de los poblados amenazados por el volcán Calbuco corresponde a Ralún ($41^{\circ}23'12''S$ $72^{\circ}19'35''W$), una localidad ubicada en el estuario del Reloncaví, al borde de la desembocadura del río Petrohué y del río Ralún o río del Este, en la región de Los Lagos. Se encuentra a 30 km de Ensenada, a 79 km de Puerto Varas, y a 24 km al sureste del volcán Calbuco (Astudillo, 2018). El carácter explosivo del volcán Calbuco permite que los lahares, cenizas y las caídas de piroclastos de mayor tamaño (10 cm de diámetro) puedan amenazar el distrito de Ralún, afectando estas últimas al sector oriental principalmente, ya que son transportados por los vientos predominantes en dirección noreste. En la Tabla 5.14 se muestra los valores de exposición y amenaza de los activos ubicados en este poblado que son afectados por los peligros del volcán Calbuco.

Tabla 5.14. Valores de exposición y amenaza de personas e infraestructuras de Ralún.

Peligro	Zona de peligro		Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto	Total	
	Puntaje		10	20	60	100	170		
Exposición	Personas		0	207	0	3	0	210,12	
	Infraestructuras	Viviendas	0	1,24	0	0,02	0		
		Centros de educación	0	2	0	0	0		
		Centros de salud	0	3	0	0	0		
		Municipios	0	0	0	0	0		
		Bomberos	0	0	0	0	0		
		Carabineros	0	0	0	0	0		
		Hidroeléctricas	0	0	0	0	0		
		Aeródromos	0	0	0	0	0		
		Rutas	0	0,46	0	0,02	0		
		Calles	0	0,06	0	0	0		
		Puentes	0	0,25	0	0	0		
Amenaza absoluta	Factores	Recurrencia	Personas	2,37	0	9819,88	0	711,59	10537,01
			Infraestructuras		0	332,45	0	9,33	
	Peligro	Personas	21	0	86940	0	6300	0	93289,09
		Infraestructuras		0	2943,33	0	82,62	0	
Amenaza normalizada	Factores	Recurrencia	Personas	2,37	0	46,76	0	3,39	50,15
			Infraestructuras		0	47,17	0	1,32	
	Peligro	Personas	21	0	414	0	30	0	443,98
		Infraestructuras		0	417,66	0	11,72	0	

Como se observa, ~98% de la población, viviendas e infraestructuras críticas de Ralún expuestas a los peligros del volcán Calbuco son amenazadas por un bajo nivel de peligro, y ~2% restante por un alto nivel de peligro. Tanto las infraestructuras sociales como las de respuesta expuestas a los peligros del volcán Calbuco se encuentran amenazadas por la zona de bajo peligro. En tanto que las infraestructuras de transporte se encuentran afectadas por las zonas de alto y bajo peligro, destacándose el camino regional principal V-69 por ser la única ruta de Ralún amenazada por estos dos niveles de peligro, y por tener un puente afectado por la zona de bajo peligro. Por su parte, el camino regional, provincial, comunal y de acceso V-775 se encuentra amenazado por un bajo nivel de peligro y contiene un puente afectado por esta misma zona de peligro. Como se observa en el mapa de amenaza de Ralún (Figura 5.14.), la totalidad de personas e infraestructuras

de este poblado se encuentran propensas a ser afectadas por los productos de una eventual erupción del volcán Calbuco.

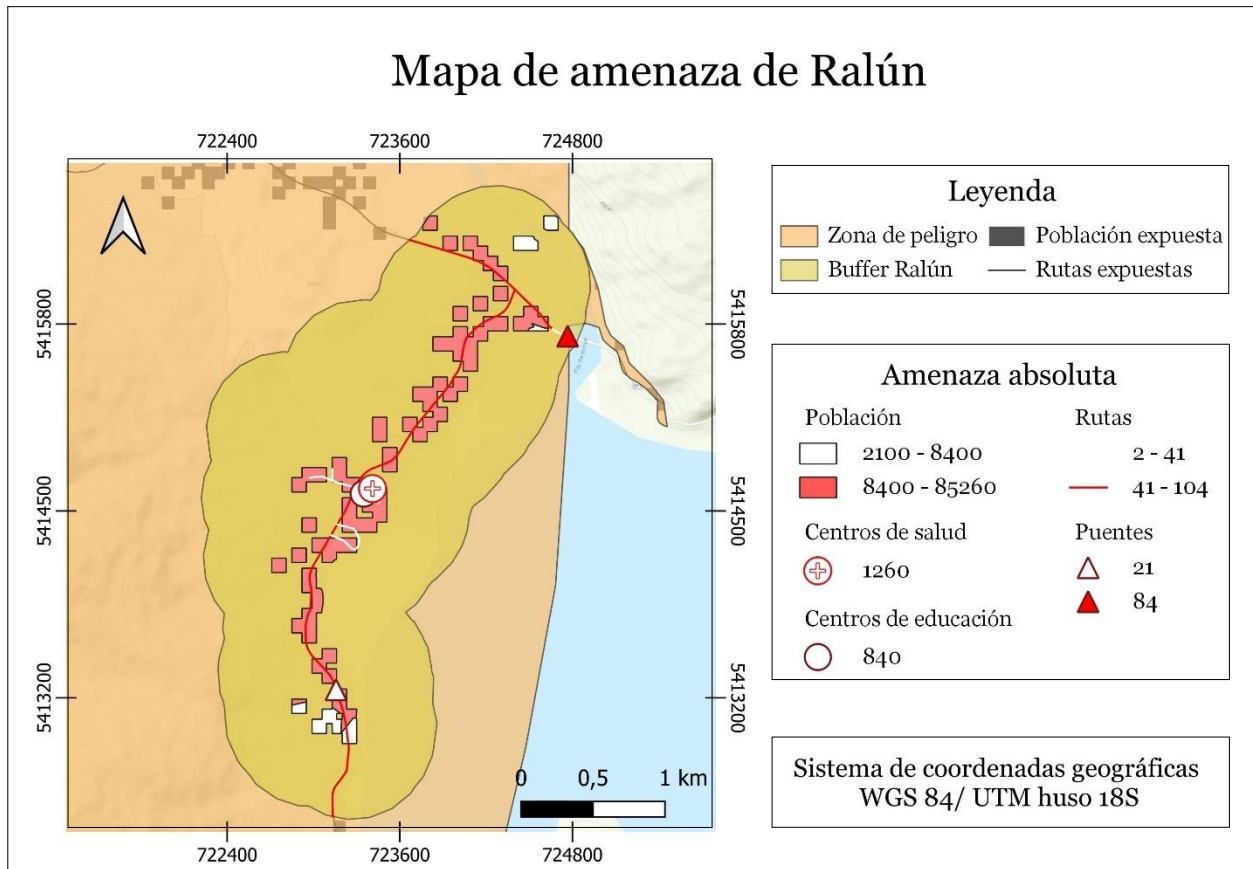


Figura 5.14. Mapa de amenaza del poblado Ralún. Elaboración propia.

5.8. 3. Correntoso

Correntoso ($41^{\circ}27'12''S$ $72^{\circ}39'32''W$) es una localidad rural, perteneciente a la comuna de Puerto Montt, región de Los Lagos. Se ubica a unos 30 km al este de la ciudad de Puerto Montt, en la ribera del río Correntoso, donde se encuentra amenazada por los peligros del volcán Calbuco, que se posiciona 11 km al norte de este poblado (Mella *et al.*, 2016). Según el mapa de peligros volcánicos zonificados de Moreno (1999b) es posible que impactos de futuras corrientes de densidad piroclástica y lahares puedan afectar los valles fluviales que nacen en los flancos S y SW del volcán Calbuco, donde hoy se ubica el poblado de Correntoso (Mella *et al.*, 2016). Los resultados de exposición y amenaza del poblado de Correntoso se muestran en la Tabla 5.15.

Tabla 5.15. Valores de exposición y amenaza de personas e infraestructuras de Correntoso.

Peligro	Zona de peligro		Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto	Total		
	Puntaje		10	20	60	100	170			
Exposición	Personas		0	7	403	67	0	477,12		
	Infraestructuras	Viviendas	0	0,03	1,79	0,4	0			
		Centros de educación	0	0	2	0	0			
		Centros de salud	0	0	3	0	0			
		Municipios	0	0	0	0	0			
		Bomberos	0	0	0	0	0			
		Carabineros	0	0	0	2	0			
		Hidroeléctricas	0	0	0	0	0			
		Aeródromos	0	0	0	0	0			
		Rutas	0	0	0,63	0,18	0			
		Calles	0	0,01	0,32	0,05	0			
		Puentes	0	0	0,2	0,2	0			
		Amenaza absoluta	Factores	Recurrencia	Personas	2,37	0		332,07	57353,77
Infraestructuras	0				1,68		1129,40	671,73	0	
Peligro	Personas		21	0	2940	507780	140700	0	651615,51	
	Infraestructuras			0	14,87	9999,14	5947,11	0		
Amenaza normalizada	Factores	Recurrencia	Personas	2,37	0	0,64	111,15	30,80	0	142,60
			Infraestructuras		0	0,15	101,93	60,62	0	
	Peligro	Personas	21	0	5,70	984,07	272,67	0	1262,53	
		Infraestructuras		0	1,34	902,41	536,72	0		

Se observa que, de todas las personas y viviendas de Correntoso expuestas a los peligros del volcán Calbuco, entre el 80-84% se encuentran amenazadas por el moderado nivel de peligro, entre 14-18% por la zona de alto peligro, y el 1% restante por el bajo nivel de peligro. De la misma forma, las infraestructuras críticas expuestas siguen esta tendencia, donde el 71% de los activos evaluados son amenazados por la zona de moderado peligro, 28% por la zona de alto, y el 1% restante por el bajo nivel de peligro. Por lo que el nivel de moderado peligro es el que induce una mayor amenaza a los habitantes, viviendas e infraestructuras de Correntoso, en comparación a las demás zonas de peligro del volcán Calbuco.

En el mapa de amenaza de Correntoso (Figura 5.15.), la ruta que cruza todo el poblado y conecta a calles laterales corresponde al camino regional principal V-65, que contiene al puente con mayor valor de exposición y amenaza. Por lo que ante una emergencia volcánica, esta ruta podría verse inhabilitada como vía de evacuación, aumentando aún más la vulnerabilidad de la población. Este camino presenta el valor de exposición y amenaza más elevado entre todas las infraestructuras de transporte de Correntoso. Es importante destacar que no toda la población, viviendas y/o rutas de esta localidad se encuentran expuestas a la zona de peligro del volcán Calbuco, pero sí una gran parte, alcanzando entre el 93-97% del total de los activos de Correntoso.

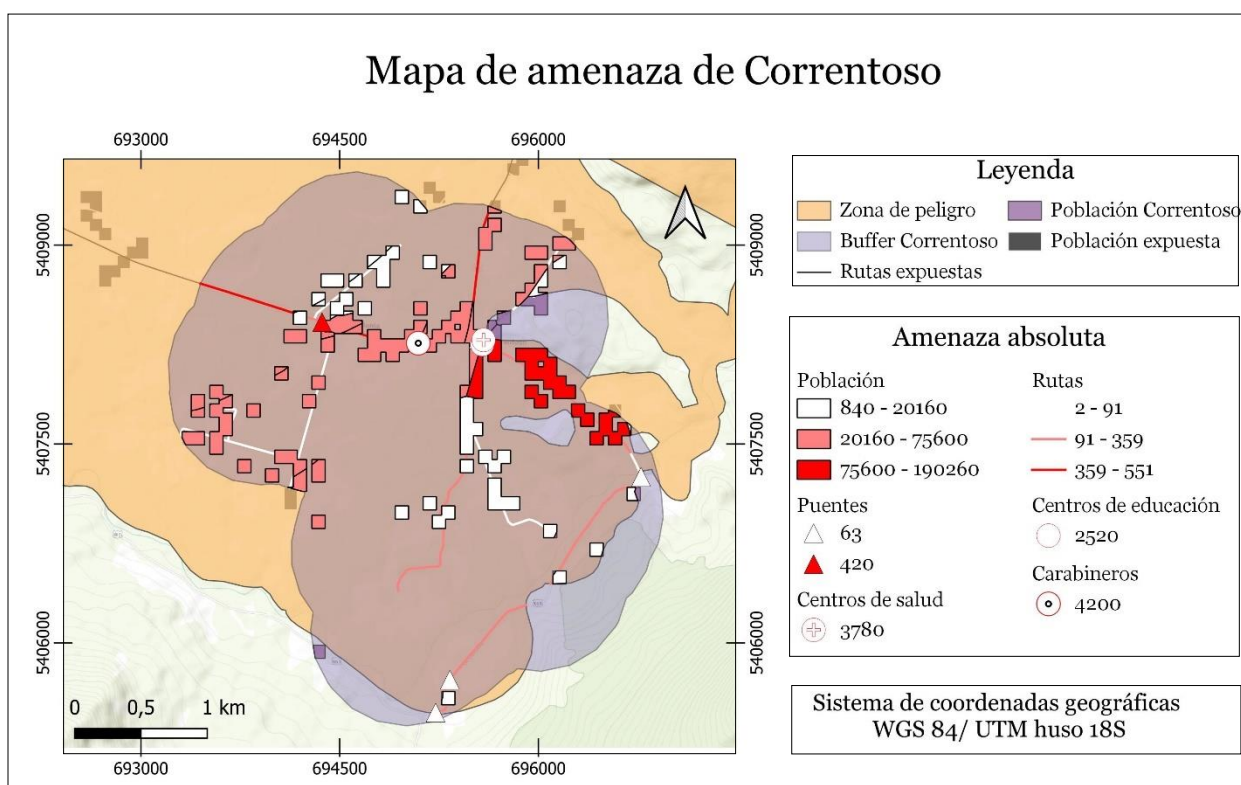


Figura 5.15. Mapa de amenaza del poblado Correntoso. Elaboración propia.

5.8. 4. Colonia Río Sur

Otro poblado amenazado por los peligros del volcán Calbuco corresponde a Colonia Río Sur ($41^{\circ} 20' 54,7''S$ $72^{\circ} 42' 12''W$). Esta localidad pertenece a la provincia Llanquihue, comuna de Puerto Varas, región de los Lagos, y se ubica a 10 km al oeste del cráter del volcán Calbuco (Mella *et al.*, 2016). Las infraestructuras de este poblado fueron afectadas por ceniza provenientes de la última erupción. Los resultados de exposición y amenaza de los activos evaluados en el poblado de Colonia Río Sur se resumen en la Tabla 5.16.

Tabla 5.16. Valores de exposición y amenaza de personas e infraestructuras de Colonia Río Sur.

Peligro	Zona de peligro		Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto	Total	
	Puntaje		10	20	60	100	180		
Exposición	Personas		0	327	0	8	0	335,32	
	Infraestructuras	Viviendas	0	1,32	0	0,03	0		
		Centros de educación	0	9	0	0	0		
		Centros de salud	0	3	0	0	0		
		Municipios	0	0	0	0	0		
		Bomberos	0	0	0	0	0		
		Carabineros	0	0	0	0	0		
		Hidroeléctricas	0	0	0	0	0		
		Aeródromos	0	0	0	0	0		
		Rutas	0	0,59	0	0,16	0		
		Calles	0	0,5	0	0	0		
		Puentes	0	0,1	0	0	0		
Amenaza absoluta	Factores	Recurrencia	2,37	Personas	0	15512,56	0	1897,561	17425,61
		Infraestructuras		0	688,67	0	45,85	0	
	Peligro	Personas	21	0	137340	0	16800	154277,12	
		Infraestructuras		0	6097,08	0	405,93		0
Amenaza normalizada	Factores	Recurrencia	2,37	Personas	0	46,31	0	5,66	51,97
		Infraestructuras		0	46,82	0	3,12	0	
	Peligro	Personas	21	0	409,97	0	50,15	460,09	
		Infraestructuras		0	414,48	0	27,60		0

Se observa que, de todos los activos de Colonia Río Sur expuestos a los peligros del volcán Calbuco, entre el 97-99% son amenazados por la zona de bajo peligro, en tanto que la porción restante se encuentra afectada por el alto nivel de peligro. Siendo la zona de bajo peligro, por lo tanto, la que somete a sus habitantes e infraestructuras a mayores valores de exposición y amenaza.

Como se observa en el mapa de amenaza de Colonia Río Sur (Figura 5.16.), el camino regional, provincial, comunal y de acceso V-613, que se encuentra amenazado por las dos zonas de peligro (bajo y alto) y que contiene dos puentes bajo amenaza, es la única vía de evacuación en caso de una posible erupción del volcán Calbuco. Por lo que sus valores de exposición y amenaza son los más elevados entre las demás rutas, calles y puentes del poblado.

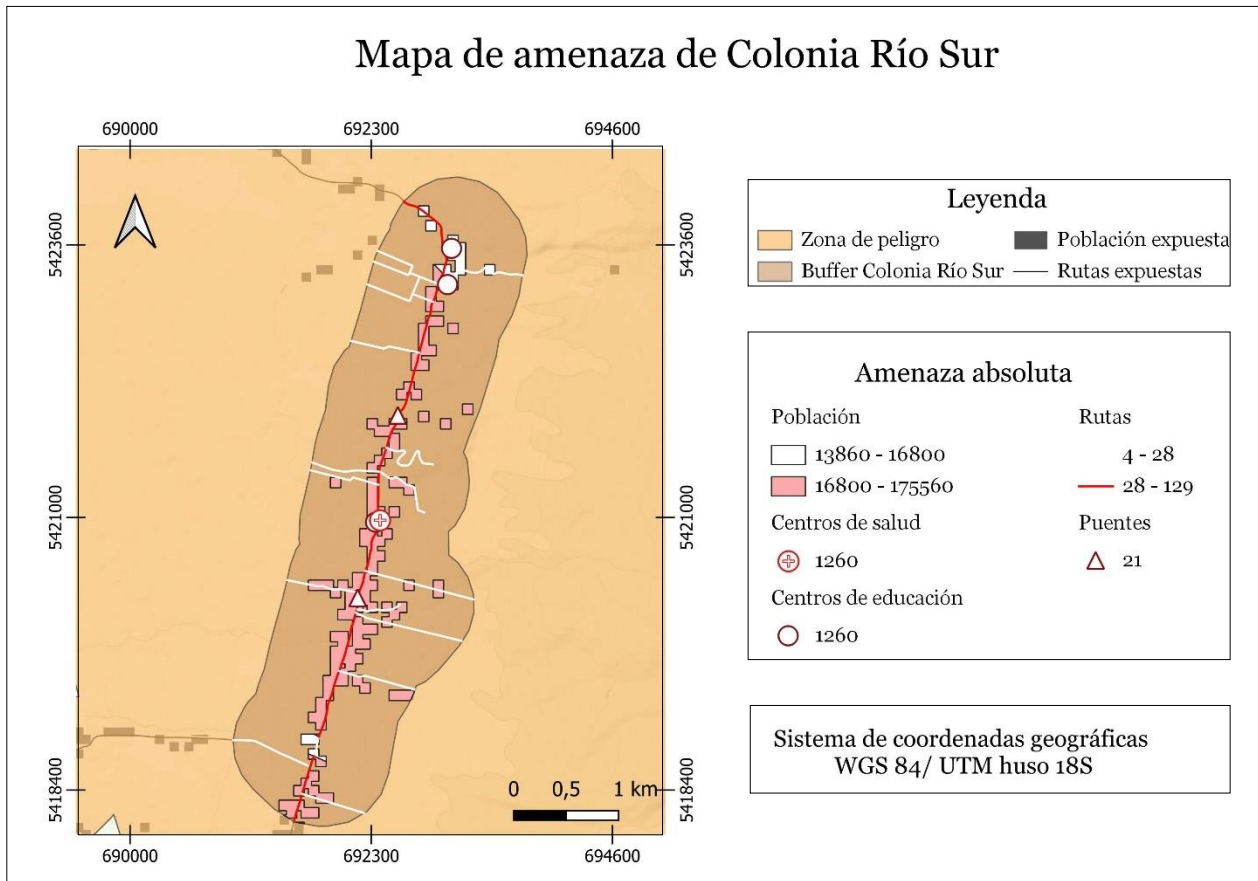


Figura 5.16. Mapa de amenaza del poblado Colonia Río Sur. Elaboración propia.

5.8. 5. Río Blanco- Colorado

Los últimos poblados amenazados por el volcán Calbuco corresponden a las localidades de Río Blanco y Río Colorado, que se ubican al sur de este centro eruptivo. Ambos se evaluaron en conjunto, como un solo poblado, debido a la dificultad para delimitar sus fronteras y extensión. Las grandes erupciones del volcán Calbuco (1893-95 y 1961) han dado lugar al desarrollo de corrientes de densidad y de lahares, los cuales afectan principalmente a los ríos de la ladera sur y en la ladera este, fundamentalmente por potentes flujos piroclásticos. El Río Blanco Sur sufre el impacto de los mayores lahares primarios, mientras que los lahares secundarios, provocados por una posible removilización de la ceniza, fueron escasos y débiles (Manville et al., 2016). Estos lahares están motivados por la mezcla de los flujos piroclásticos emitidos con el hielo y la nieve (Dusillant et al., 2016), movilizándose a lo largo del Río Blanco Sur hacia el Lago Chapo (Cárdenas et al., 2018). Los cambios en la acumulación de nieve durante distintos periodos del

año, hacen que incremente el volumen de los flujos de detritos. Como es el caso del cauce del río Colorado (sur), el cual en febrero sostendría lahares con volúmenes de unos $3 \times 10^6 m^3$, mientras que en septiembre podrían alcanzar hasta $28 \times 10^6 m^3$ (Moreno, 1998). En la Tabla 5.17 se resumen los resultados de exposición y amenaza de los activos evaluados que se localizan en el poblado Río Blanco-Colorado.

Tabla 5.17. Valores de exposición y amenaza de personas e infraestructuras del Río Blanco-Colorado.

Peligro	Zona de peligro		Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto	Total		
	Puntaje		10	20	60	100	170			
Exposición	Personas		0	4	1	38	0	43,17		
	Infraestructuras	Viviendas	0	0,03	0,01	0,56	0			
		Centros de educación	0	0	0	2	0			
		Centros de salud	0	0	0	0	0			
		Municipios	0	0	0	0	0			
		Bomberos	0	0	0	0	0			
		Carabineros	0	0	0	0	0			
		Hidroeléctricas	0	0	0	0	0			
		Aeródromos	0	0	0	0	0			
		Rutas	0	0,02	0	0,53	0			
		Calles	0	0,01	0	0,28	0			
		Puentes	0	0	0	0,4	0			
Amenaza absoluta	Factores	Recurrencia	Personas	2,37	0	189,76	142,32	9013,41	0	9388,55
			Infraestructuras		0	2,78	1,42	894,04	0	
	Peligro	Personas	21	0	1680	1260	79800	0	83121,31	
		Infraestructuras		0	24,64	12,60	7915,35	0		
Amenaza normalizada	Factores	Recurrencia	Personas	2,37	0	4,41	3,31	209,61	0	217,47
			Infraestructuras		0	0,73	0,37	232,95	0	
	Peligro	Personas	21	0	39,07	29,30	1855,81	0	1925,40	
		Infraestructuras		0	6,42	3,28	2062,42	0		

Se muestra que, del total de personas y viviendas expuestas, entre el 88-93% se encuentra amenazada por la zona de alto peligro del volcán Calbuco, entre el 5-9% se encuentra afectada por la zona de bajo peligro, y ~2% restante se encuentra bajo amenaza por el moderado nivel de peligro. Por su parte, las infraestructuras críticas expuestas siguen esta misma tendencia, donde el 99% de ellas son susceptibles a ser afectadas por la zona de alto peligro y el 1% restante se encuentra amenazada por el bajo nivel de peligro. Por lo que, los activos con mayor valor de exposición y amenaza se ubican en la zona de alto peligro.

Como se observa en el mapa de amenaza de Río Blanco-Colorado (Figura 5.17.) todos los activos que se ubican dentro del buffer que delimita al poblado, están siendo amenazados por algún nivel de peligro del volcán Calbuco. Destacándose el camino regional principal V-65, por conectar a este poblado con la localidad de Correntoso, contener dos puentes bajo amenaza y por presentar el valor de exposición y amenaza más elevado entre todas las rutas.

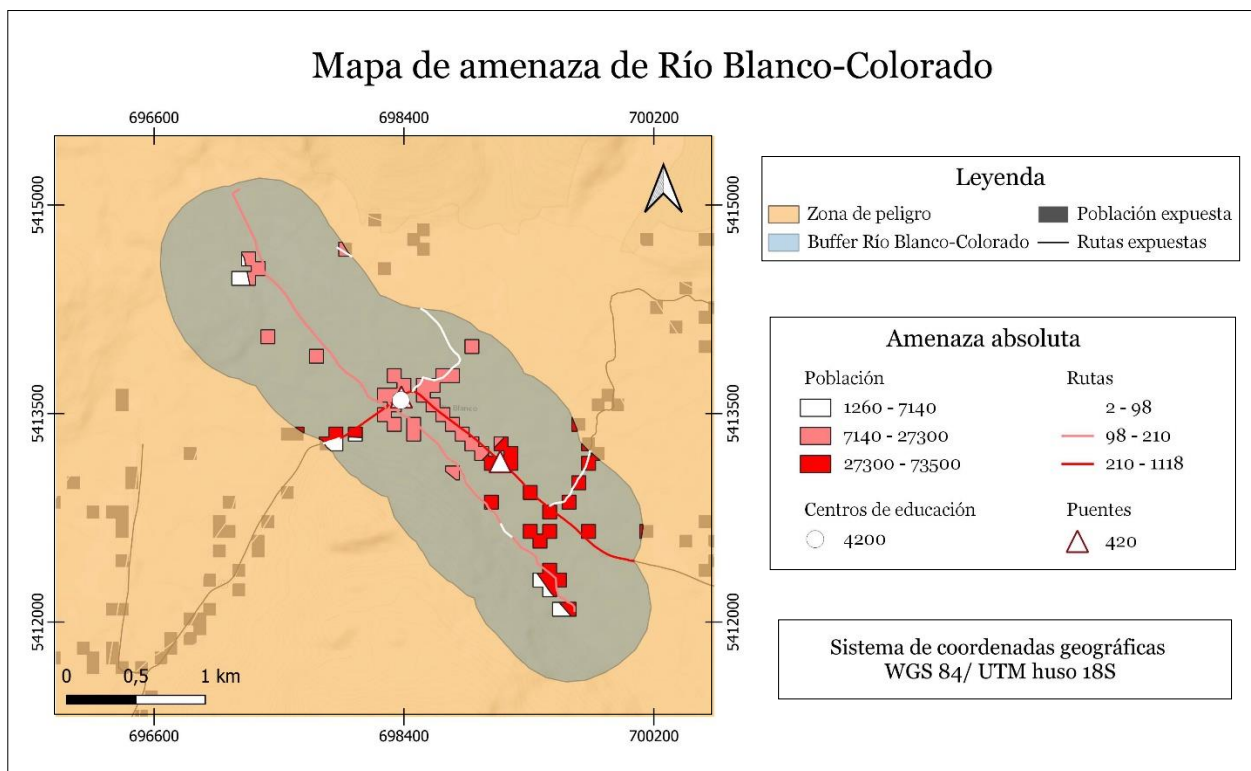


Figura 5.17. Mapa de amenaza del poblado Río Blanco-Colorado. Elaboración propia.

5.9. VOLCÁN CHAITÉN

En la Tabla 5.18 se muestra el valor de exposición y amenaza de los activos propensos a ser afectados por alguna zona de peligro del volcán Chaitén. Para el caso de este centro eruptivo, el factor de recurrencia corresponde a 1,55, en función de la ecuación: $\ln(e + 2)$, que caracteriza a las 2 erupciones ocurridas en los últimos 1800 años. En tanto, el factor de peligro, según el ranking de riesgo específico del SERNAGEOMIN (2019), corresponde a 20.

Tabla 5.18. Valores de exposición y amenaza de personas e infraestructuras del volcán Chaitén.

Peligro	Zona de peligro		Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto	Total	
	Puntaje		10	20	60	100	170		
Exposición	Personas		0	6	119	116	1427	1668,63	
	Infraestructuras	Viviendas	0	0,04	0,61	0,54	6,44		
		Centros de educación	0	0	0	0	3		
		Centros de salud	0	0	0	0	5		
		Municipios	0	0	0	0	4		
		Bomberos	0	0	0	0	2		
		Carabineros	0	0	0	0	2		
		Hidroeléctricas	0	0	0	0	0		
		Aeródromos	0	0	3	3	0		
		Rutas	0	5,28	2,38	0,81	4,04		
		Puentes	0	1,25	0,4	0	2		
Amenaza absoluta	Factores	Recurrencia	Personas	1,55	0	186,17	11077,32	17996,76	376364,97
			Infraestructuras		0	203,95	594,93	674,72	
	Peligro	Personas	20	0	2400	142800	232000	4851800	5230282
		Infraestructuras		0	2629,20	7669,41	8697,99	96818,56	
Amenaza normalizada	Factores	Recurrencia	Personas	1,55	0	0,11	6,64	10,79	225,64
			Infraestructuras		0	4,45	12,99	14,74	
	Peligro	Personas	20	0	1,44	85,61	139,09	2908,75	3134,48
		Infraestructuras		0	57,42	167,49	189,96	2114,44	

Se muestra que ~85% de las personas y viviendas expuestas a los peligros del volcán Chaitén, se encuentran amenazadas por la zona de muy alto peligro, ~7% son afectadas por el alto nivel de peligro y un mismo ~7% por un moderado nivel, y finalmente, ~1% restante son amenazadas por la zona de bajo peligro. En tanto, las infraestructuras críticas expuestas siguen la misma tendencia,

donde el 62% de ellas estarían amenazadas por un muy alto nivel de peligro y el resto estarían afectadas por los tres niveles de peligro (alto, moderado y bajo), casi en la misma proporción (~13% cada uno). Por lo tanto, el nivel de muy alto peligro del volcán Chaitén es en el que se ubican los activos evaluados con valores de exposición y amenaza más altos.

Como se muestra en el mapa de amenaza del volcán Chaitén (Figura 5.18.), la mayor parte de los activos expuestos se ubican en el sector suroccidental de la zona de peligro, donde se localiza el poblado de Chaitén. Con respecto a las infraestructuras de transporte, se destaca la ruta nacional longitudinal 7, por presentar los valores de exposición y amenaza más elevados (Anexo 8), bordear al volcán Chaitén y mantener conectado al poblado de Chaitén con el resto de las localidades. Esta ruta contiene 9 puentes expuestos, lo que incrementa aún más su valor de amenaza, debido a que, ante una emergencia volcánica, estos activos son cruciales en los planes de evacuación.

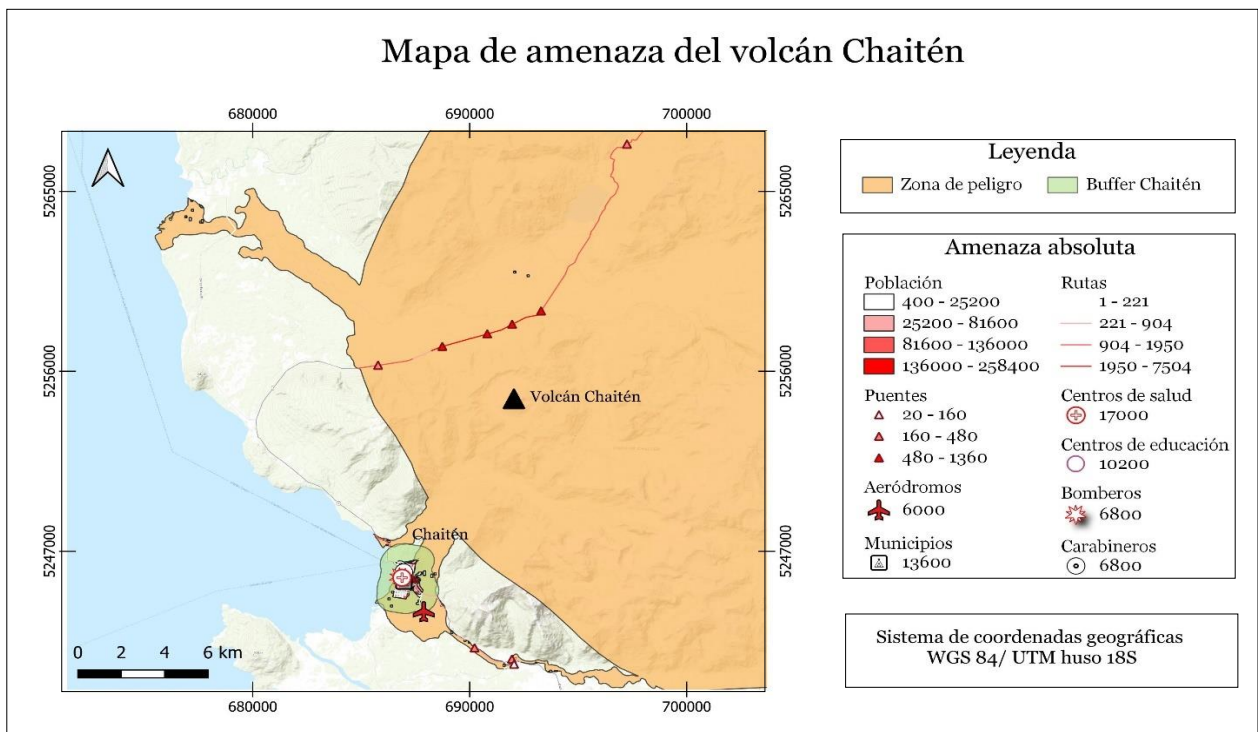


Figura 5.18. Mapa de amenaza del volcán Chaitén. Elaboración propia.

5.9. 1. Chaitén

La ciudad costera de Chaitén ($43^{\circ}5'38''S$, $72^{\circ}34'33''W$), ubicada en la región de Los Lagos, se asienta sobre una amplia llanura, cerca de la desembocadura del río Chaitén (Major & Lara, 2013), que representa un abanico de inundaciones volcánicas más antiguas y depósitos de lahar a 10 km al sur del volcán homónimo. Producto de la erupción de este volcán el año 2008, la ciudad de

Chaitén comenzó a ser afectada por la ocurrencia de lahares e inundaciones, debido al aumento de carga, principalmente, cenizas y pómez, se produjo el embancamiento del curso bajo del río Chaitén, el que modificó su curso e inundó parte de la ciudad y aeródromo (Major *et al.*, 2013). La acumulación de 1 km^3 de material piroclástico y sedimentos transportados hacia la bahía comenzaron a construir deltas de ceniza, actualmente en expansión (Lara & Calderón, 2015). Además, la removilización de este material producto de las intensas precipitaciones causó aluviones volcánicos e inundaciones en los valles adyacentes dañando severamente la ciudad de Chaitén (Major & Lara, 2013). Los valores de exposición y amenaza de los activos que se ubican en el poblado de Chaitén se muestran en la Tabla 5.19.

Tabla 5.19. Valores de exposición y amenaza de personas e infraestructuras de la ciudad de Chaitén.

Peligro	Zona de peligro		Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto	Total		
	Puntaje		10	20	60	100	170			
Exposición	Personas		0	0	102	112	1427	1641,29		
	Infraestructuras	Viviendas	0	0	0,5	0,52	6,44			
		Centros de educación	0	0	0	0	3			
		Centros de salud	0	0	0	0	5			
		Municipios	0	0	0	0	4			
		Bomberos	0	0	0	0	2			
		Carabineros	0	0	0	0	2			
		Hidroeléctricas	0	0	0	0	0			
		Aeródromos	0	0	0	3	0			
		Rutas	0	0	0,40	0,34	0,56			
		Calles	0	0	0,01	0,01	1,27			
		Puentes	0	0	0	0	2			
Amenaza absoluta	Factores	Recurrencia	Personas	1,55	0	0	9494,84	17376,18	376364,97	403307,87
			Infraestructuras		0	0	85,36	600,16	6928,35	
	Peligro	Personas	20	0	0	122400	224000	4851800	5199126,57	
		Infraestructuras		0	0	1100,44	7736,75	89314,83		
Amenaza normalizada	Factores	Recurrencia	Personas	1,551	0	0	5,62	10,29	222,97	238,88
			Infraestructuras		0	0	2,70	18,97	219,01	
	Peligro	Personas	20	0	0	72,51	132,70	2874,29	3079,51	
		Infraestructuras		0	0	34,79	244,57	2823,32		

Se muestra que entre el 85-87% de las personas, viviendas e infraestructuras críticas localizadas en el poblado de Chaitén y expuestas a algún nivel de peligro volcánico, son amenazadas por la zona de muy alto peligro del volcán Chaitén, entre el 7-12% son afectadas por la zona de alto peligro, y entre el 3-6% restante se encuentran amenazadas por un bajo nivel de peligro. Siendo la zona de muy alto peligro del volcán Chaitén el nivel que imparte una mayor amenaza a la población e infraestructuras de la localidad de Chaitén.

Como se observa en el mapa de amenaza de Chaitén (Figura 5.19.), no todos los activos evaluados en el poblado se encuentran expuestos a los peligros del Volcán Chaitén, pero sí la gran mayoría de ellos. Se calcula que ~97% de la población, viviendas, infraestructuras sociales y de respuesta localizadas en el poblado, se encuentran expuestas a algún peligro volcánico. En tanto que, ~79% de las rutas ubicadas dentro del buffer que delimita el área del poblado, se encuentran amenazadas por algún nivel de peligro del volcán Chaitén. En este aspecto, la ruta que presenta el valor de exposición y amenaza más elevado es la ruta nacional 7, por estar expuesta a los tres niveles de peligro (moderado, alto y muy alto), por contener un puente amenazado por la zona de muy alto peligro, y por ser la única vía de evacuación disponible ante una emergencia volcánica.

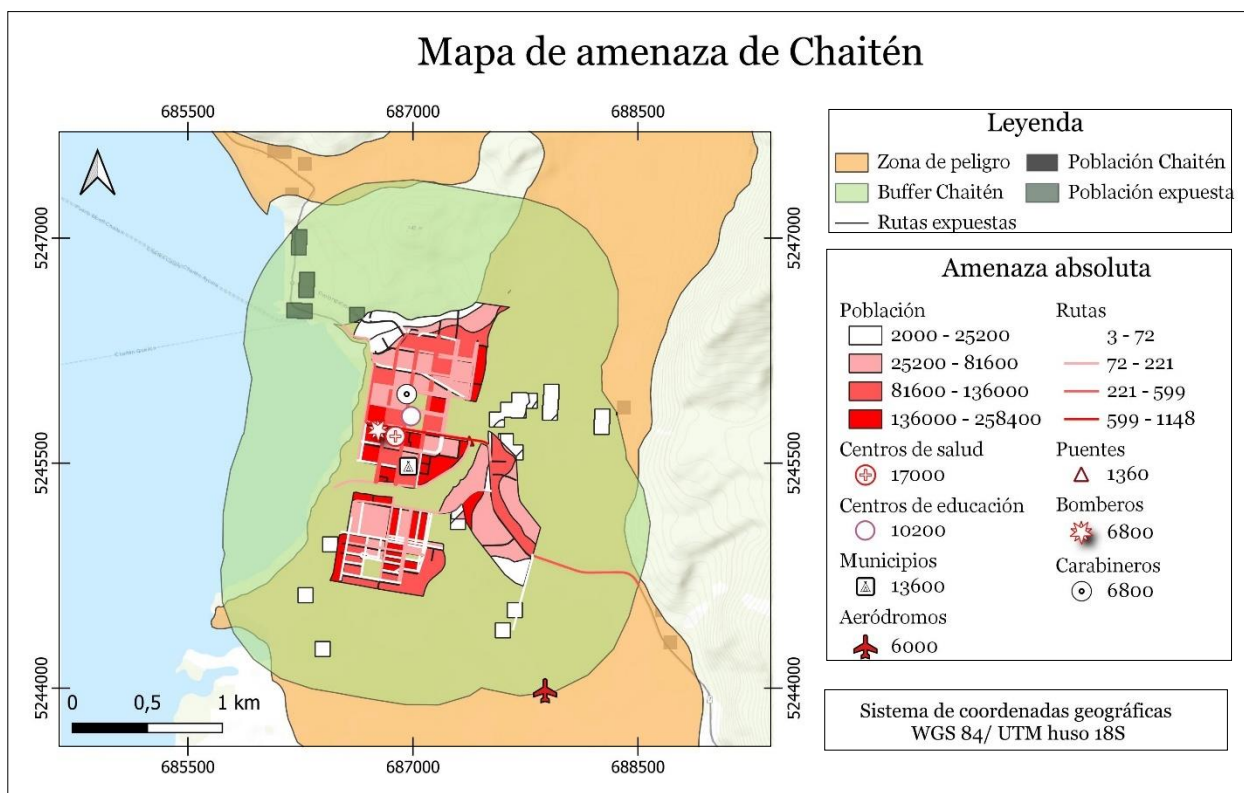


Figura 5.19. Mapa de amenaza del poblado Chaitén. Elaboración propia.

5.10. VOLCÁN HUDSON

En la Tabla 5.20 se muestran los resultados de exposición y amenaza de personas y viviendas afectadas por la zona de alto peligro del volcán Hudson. Con respecto a la amenaza, el factor de recurrencia corresponde a 2,17, en función de la ecuación: $\ln(e + 6)$, que registra 6 erupciones con depósitos de flujos de VEI > 1 en los últimos 1800 años. En tanto que el factor de peligro corresponde a 21, según el ranking de riesgo específico de volcanes activos del SERNAGEOMIN (2019).

Tabla 5.20. Valores de exposición y amenaza de personas e infraestructuras del volcán Hudson.

Peligro	Zona de peligro		Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto	Total	
	Puntaje		10	20	60	100	170		
Exposición	Infraestructuras	Personas		0	0	0	7	7	
		Viviendas		0	0	0	0,06		
		Centros de educación		0	0	0	0		
		Centros de salud		0	0	0	0		
		Municipios		0	0	0	0		
		Bomberos		0	0	0	0		
		Carabineros		0	0	0	0		
		Hidroeléctricas		0	0	0	0		
		Aeródromos		0	0	0	0		
		Rutas		0	0	0	0		
		Puentes		0	0	0	0		
Amenaza absoluta	Factores	Recurrencia	Personas		2,17	0	0	1515,80	1515,85
			Infraestructuras			0	0	12,99	
	Peligro	Personas		21	0	0	0	14700	14700,54
		Infraestructuras			0	0	0	126	
Amenaza normalizada	Factores	Recurrencia	Personas		2,2	0	0	216,54	216,54
			Infraestructuras			0	0	0	
	Peligro	Personas		21	0	0	0	2100	2100
		Infraestructuras			0	0	0	2100	

Se observa que la totalidad de personas y viviendas expuestas a los peligros impartidos por el volcán Hudson, se encuentran amenazadas por un alto nivel de peligro. En tanto que no existen infraestructuras críticas (sociales, respuesta, energía y transporte) expuestas a algún nivel de peligro, por lo tanto, la amenaza de todos estos activos es 0. En el mapa de amenaza del volcán

Hudson (Figura 5.20.) se visualiza que las personas y viviendas expuestas a la zona de peligro de este centro eruptivo, se localizan en la desembocadura del río Huemules, siendo la vía marítima la única vía de acceso o de conexión con alguna localidad rural.

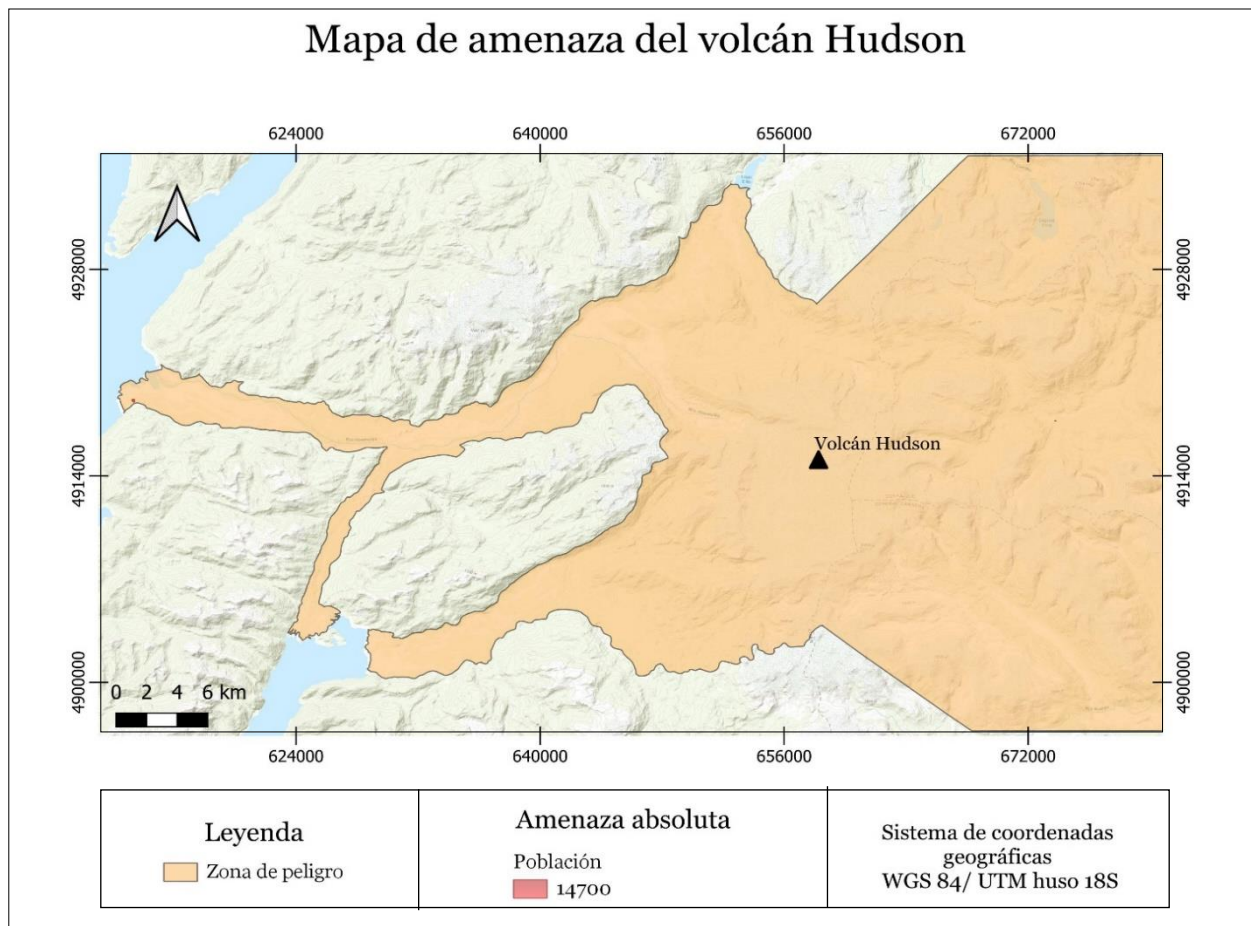


Figura 5.20. Mapa de amenaza del volcán Hudson. Elaboración propia.

5.11. RANKING FINAL

La integración de los resultados de la evaluación de la amenaza volcánica de todos los activos afectados por los peligros de los distintos volcanes y sus poblados aledaños, permitió la clasificación relativa de la amenaza volcánica entre los centros eruptivos analizados en esta tesis, por medio de la elaboración de distintos rankings según lo que se pretenda comparar: amenaza absoluta total usando el factor de peligro en sistemas volcánicos (Tabla 5.21) y poblados (Tabla 5.22); amenaza absoluta total usando el factor de recurrencia en sistemas volcánicos (Tabla 5.23) y poblados (Tabla 5.24); amenaza normalizada total usando el factor de peligro en sistemas volcánicos (Tabla 5.25) y poblados (Tabla 5.26); y amenaza normalizada total usando el factor de

recurrencia en sistemas volcánicos (Tabla 5.27) y poblados (Tabla 5.28). Estos rankings permiten visualizar y comparar el nivel de amenaza entre los volcanes de estudio, evidenciando su influencia en la determinación de la amenaza a la que se someten las localidades que se ubican en su cercanía.

Tabla 5.21. Ranking de amenaza absoluta en sistemas volcánicos con factor de peligro.

Posición	Sistema volcánico	Amenaza absoluta
1	Chaitén	5230282,42
2	Quetrupillán	5066432,31
3	Calbuco	3399191,6
4	Osorno	2519966,95
5	Taapacá	1575638,55
6	Tupungatito	305395,24
7	Planchón-Peteroa	64871,87
8	Hudson	14700,54
9	San Pedro	8694,59
10	Cerro Azul-Quizapu	0

Tabla 5.23. Ranking de amenaza absoluta en sistemas volcánicos con factor de recurrencia.

Posición	Sistema volcánico	Amenaza absoluta
1	Quetrupillán	554462,62
2	Chaitén	405724,7
3	Calbuco	383938,83
4	Osorno	234151,94
5	Taapacá	175070,95
6	Tupungatito	71204,46
7	Planchón-Peteroa	9968,36
8	Hudson	1515,85
9	San Pedro	1226,29
10	Cerro Azul-Quizapu	0

Tabla 5.22. Ranking de amenaza absoluta en poblados con factor de peligro.

Posición	Poblado	Amenaza absoluta
1	Chaitén	5199126,6
2	Las Cascadas	1736237,1
3	Putre	1558913,6
4	Curarrehue	1443688,4
5	Ensenada	1020806,2
6	Correntoso	651615,51
7	Colonia Río Sur	154260,61
8	Ralún	93289,09
9	Río Blanco-Colorado	83121,31
10	Los Queñes	49114,06

Tabla 5.24. Ranking de amenaza absoluta en poblados con factor de recurrencia.

Posición	Poblado	Amenaza absoluta
1	Chaitén	403307,87
2	Putre	173212,62
3	Las Cascadas	161328,82
4	Curarrehue	157995,06
5	Ensenada	112859,51
6	Correntoso	73600
7	Colonia Río Sur	17423,74
8	Ralún	10537,01
9	Río Blanco-Colorado	9388,55
10	Los Queñes	7546,98

Tabla 5.25. Ranking de amenaza normalizada en sistemas volcánicos con factor de peligro.

Posición	Sistema volcánico	Amenaza normalizada
1	Chaitén	3134,48
2	Hudson	2100
3	Osorno	1415,89
4	Tupungatito	1206,89
5	Calbuco	998,76
6	Taapacá	899,08
7	Quetrupillán	781,86
8	San Pedro	493,24
9	Planchón-Peteroa	350
10	Cerro Azul-Quizapu	0

Tabla 5.26. Ranking de amenaza normalizada en poblados con factor de peligro.

Posición	Poblado	Amenaza normalizada
1	Chaitén	3079,51
2	Las Cascadas	1933,14
3	Río Blanco-Colorado	1925,4
4	Correntoso	1262,53
5	Ensenada	1241,28
6	Putre	900
7	Curarrehue	632,3
8	Colonia Río Sur	460,06
9	Ralún	443,98
10	Los Queñes	204,4

Tabla 5.27. Ranking de amenaza normalizada en sistemas volcánicos con factor de recurrencia.

Posición	Sistema volcánico	Amenaza normalizada
1	Tupungatito	281,39
2	Chaitén	243,15
3	Hudson	216,54
4	Osorno	131,56
5	Calbuco	112,81
6	Taapacá	99,90
7	Quetrupillán	85,57
8	San Pedro	69,57
9	Planchón-Peteroa	53,78
10	Cerro Azul-Quizapu	0

Tabla 5.28. Ranking de amenaza normalizada en poblados con factor de recurrencia.

Posición	Poblado	Amenaza normalizada
1	Chaitén	238,88
2	Río Blanco-Colorado	217,47
3	Las Cascadas	179,62
4	Correntoso	142,6
5	Ensenada	137,23
6	Putre	100
7	Curarrehue	69,2
8	Colonia Río Sur	51,96
9	Ralún	50,15
10	Los Queñes	31,41

6. DISCUSIONES

En el siguiente capítulo se comparará relativamente la amenaza de los volcanes de estudio y los poblados afectados por sus respectivos peligros volcánicos. Se discutirá sobre: los factores usados en la metodología; las diferencias entre amenaza absoluta y normalizada; el contraste entre los valores de exposición y amenaza; las correlaciones entre los activos evaluados; las implicancias de las variables utilizadas en la metodología; y las limitaciones que presenta la evaluación de amenaza volcánica.

6.1. FACTOR DE PELIGRO O FACTOR DE RECURRENCIA

Como se explicó en el capítulo de metodología, la incorporación de un factor (peligro o recurrencia) a la ecuación de amenaza volcánica, permite parametrizar y comparar de manera más precisa y certera, los distintos niveles de peligro entre volcanes, y la amenaza que estos imparten a las localidades y a sus activos evaluados (población e infraestructuras).

En la Figura 6.1. se muestra la amenaza total de los volcanes de estudio, la cual considera la evaluación de personas, viviendas e infraestructuras críticas, utilizando ambos factores. Como se puede observar en la Figura 6.1 (a), el valor de amenaza absoluta de los distintos centros eruptivos según el factor de recurrencia versus el factor de peligro, refleja una asociación casi lineal entre ambas variables, donde el coeficiente de correlación de Pearson corresponde a 0,97. De la misma forma, la Figura 6.1 (b) muestra el valor de amenaza normalizada de los edificios volcánicos evaluados según el factor de recurrencia y el factor de peligro, evidenciando la misma tendencia lineal entre ambos factores. Para estas variables el coeficiente de correlación de Pearson corresponde a 0,8, y su principal diferencia se observa en la posición del volcán Tupungatito, el cual escapa de esta correlación lineal.

Por otro lado, en la Figura 6.2 se grafica la amenaza absoluta (a) y la amenaza normalizada (b) en los poblados según el factor de peligro versus el factor de recurrencia. Como se vuelve a comprobar, existe una relación lineal entre ambos factores, marcados por un coeficiente de correlación de Pearson de 0,98, para el caso de la amenaza absoluta, y de 0,97 para el caso de la amenaza normalizada.

El coeficiente de correlación de Pearson cuantifica el grado de cambio de una variable en función del cambio de la otra, si este coeficiente es ≥ 0 el valor de una variable aumenta con el aumento de la otra. Como en todos los casos de amenaza calculados con el factor de peligro y el de recurrencia, el coeficiente de Pearson se acerca a 1, se puede inferir que existe una correlación entre el factor

de peligro y el de recurrencia, por lo que se podría predecir aproximadamente el valor de un factor ante la variación del otro.

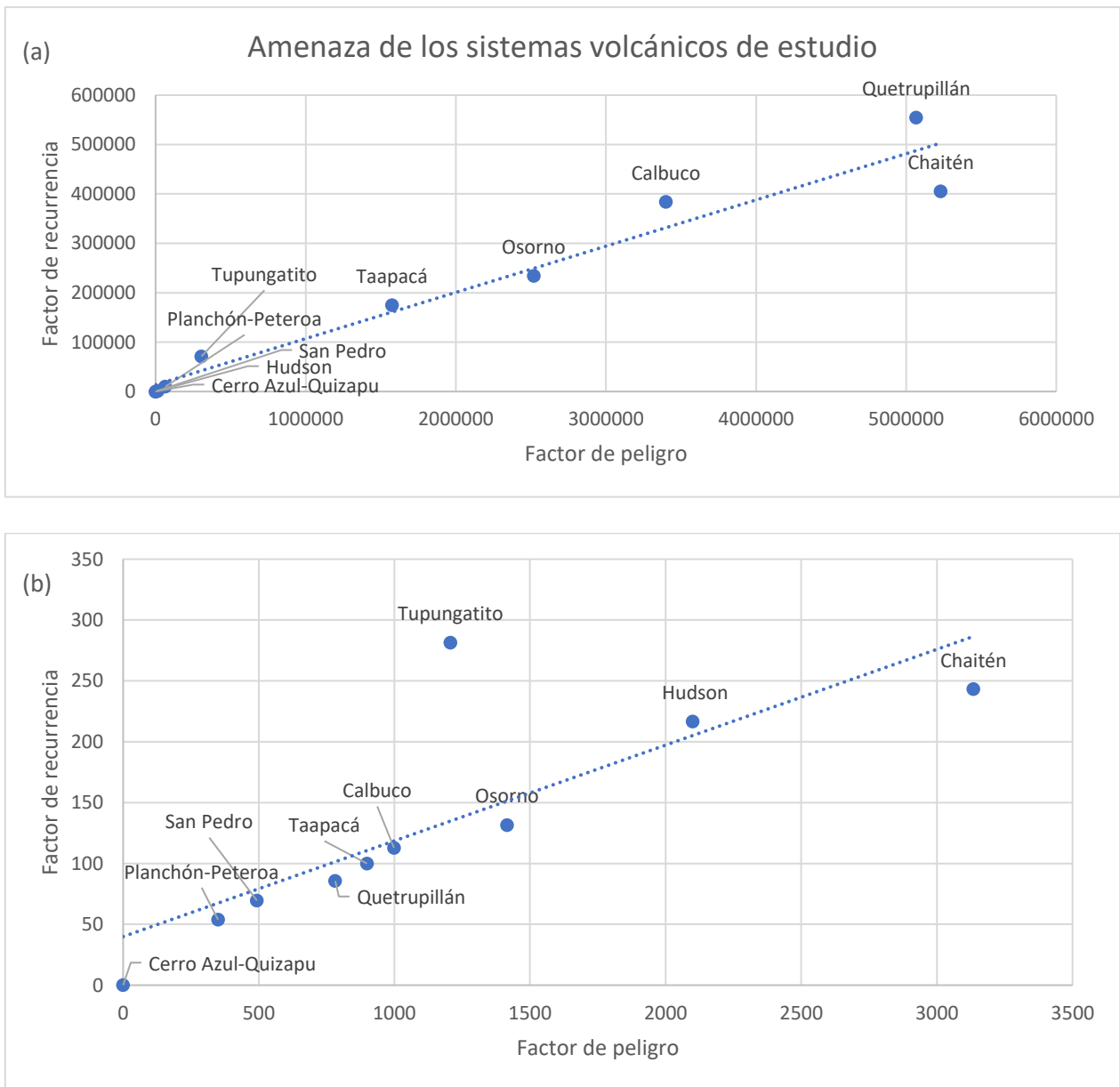


Figura 6.1. Amenaza absoluta (a) y amenaza normalizada (b) de los distintos sistemas volcánicos usando el factor de peligro versus el factor de recurrencia.

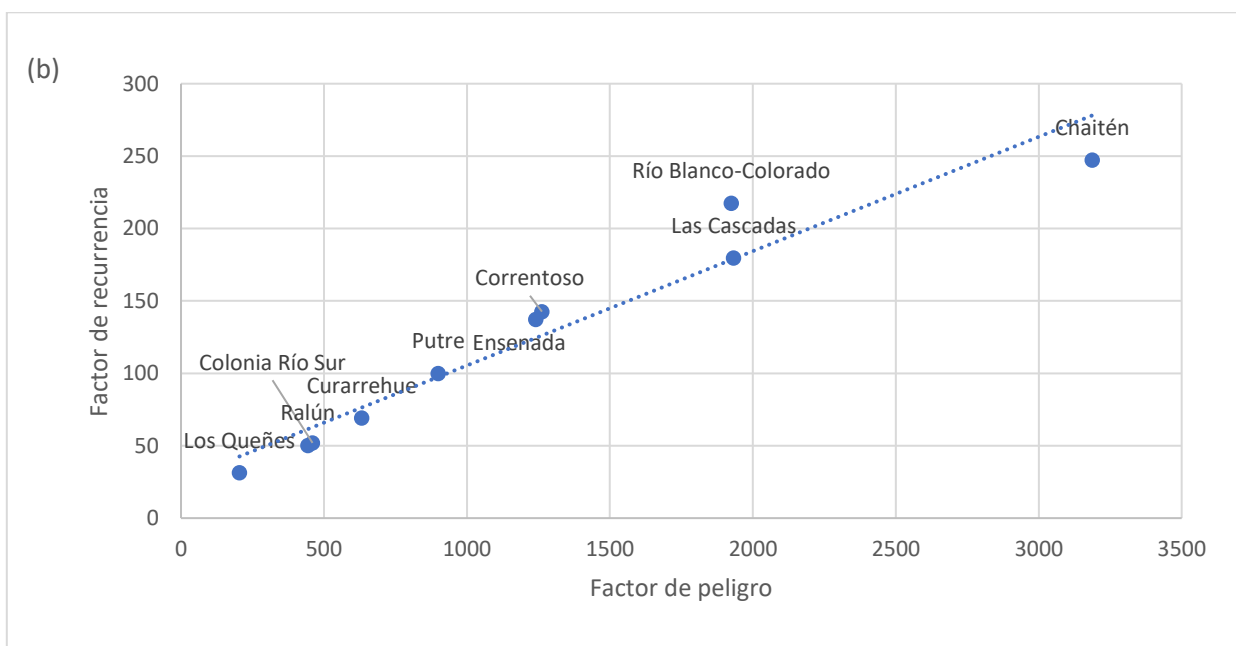
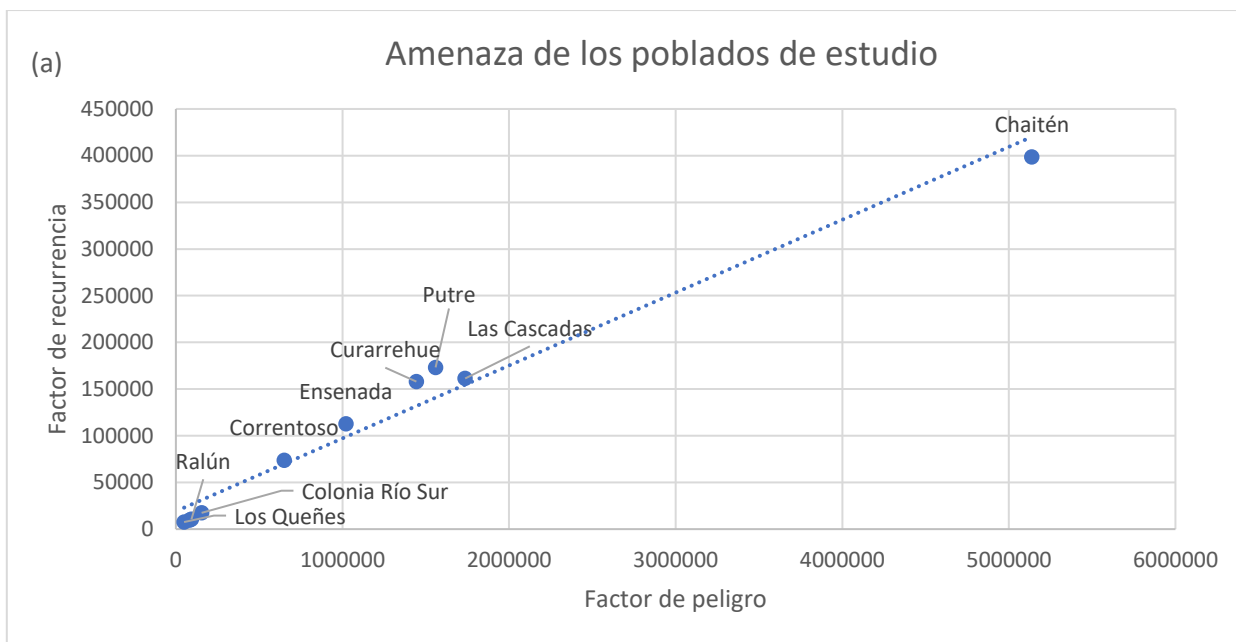


Figura 6.2. Amenaza absoluta (a) y amenaza normalizada (b) de los poblados afectados por los peligros volcánicos de los centros eruptivos aledaños, usando el factor de peligro versus el factor de recurrencia.

A diferencia de las relaciones observadas anteriormente entre ambos factores en la evaluación de la amenaza tanto absoluta como normalizada, al graficar el factor de peligro versus el de recurrencia de cada centro eruptivo (Figura 6.3), no se evidencia una correlación entre ambas variables, cuyo coeficiente de Pearson es 0,48.

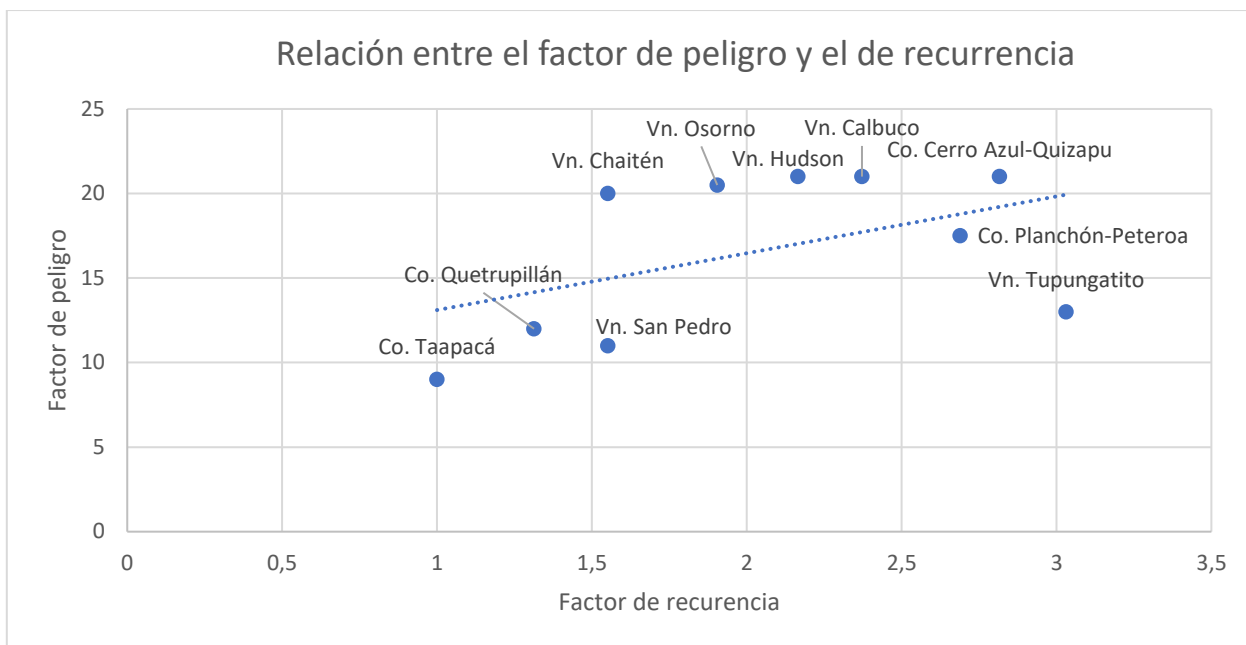


Figura 6.3. Relación entre el factor de peligro y factor de recurrencia de los distintos centros eruptivos.

El factor de peligro propuesto por el SERNAGEOMIN (2019) y adaptado del NVEWS incorpora: el máximo VEI en el Holoceno, la actividad explosiva y la recurrencia eruptiva, entre otros parámetros. Por ende, al emplear este factor a la evaluación de amenaza, se integra de alguna forma también el registro eruptivo de cada volcán.

Por otro lado, el factor de recurrencia que considera el número de erupciones presenta limitaciones, debido a que la representatividad de los eventos eruptivos está restringida por ciertos factores: (1) no hay un acuerdo con respecto a las fechas y duración de las erupciones entre los diferentes autores; (2) muchos reportes de erupciones de VEI 1 en realidad no son erupciones; (3) las erupciones pueden ser subjetivas a observaciones indirectas o difíciles de comprobar. Es por esto que se restringió el registro eruptivo de cada volcán, a los proporcionados por Petit-Breuilh (2004) y Smithsonian Institution, considerando sólo las erupciones de $VEI \geq 1$ que presentan flujos de lavas y/o piroclásticos como productos, y registradas desde el año 1800 hasta la actualidad. Esto con el objetivo de representar el comportamiento volcánico con erupciones que efectivamente tuvieron lugar en los últimos años. Sin embargo, el no considerar todas las erupciones holocenas puede interpretarse como una subestimación del factor de recurrencia. Debido a que si bien, lo que se pretende es acotar y redefinir mejor los ciclos eruptivos con un registro seguro y comprobable, siguen quedando fuera grandes erupciones cuya evidencia científica asegura su existencia, como la erupción del volcán Chaitén en 1640 de VEI 4 (Smithsonian Institution). Si bien, es posible realizar modificaciones en el registro utilizado para

la evaluación de amenaza, incorporando erupciones desde años más remotos, se consideró que la información obtenida en los últimos 220 años es fidedigna, segura y suficiente para proporcionar un registro actualizado de la historia eruptiva de cada volcán de estudio.

Como el factor de recurrencia se encuentra restringido por varias condiciones, tiende a ser un factor más subjetivo que el factor de peligro. La principal diferencia entre ambos, es que este último factor no depende completamente de que tan completos sean los registros históricos, ya que además incluye otros parámetros como el tipo de volcán y la ocurrencia de lavas, flujos piroclásticos, lahares, entre otros; sin excluir actividad holocena relevante. Por lo que finalmente se considera óptimo incorporar en la evaluación de amenaza volcánica el factor de peligro por sobre el de recurrencia, principalmente por la validación que este representa.

6.2. AMENAZA ABSOLUTA Y AMENAZA NORMALIZADA

Como se comentó en el capítulo de metodología y se demostró en el capítulo de resultados, la amenaza absoluta nos indica el nivel de peligro volcánico al que se exponen las personas, viviendas e infraestructuras críticas que se ubican en las cercanías de los distintos centros eruptivos. En tanto, la amenaza normalizada de cada sistema volcánico, pretende mostrar el peligro ponderado en las zonas susceptibles de ser afectadas por peligros volcánicos. La ecuación de la amenaza normalizada en volcanes incorpora el valor de la amenaza absoluta total y la exposición total de activos evaluados, cuyo valor depende principalmente de la cantidad de personas expuestas. Así, la amenaza normalizada muestra el nivel de amenaza que imparte el volcán, considerando principalmente la distribución de las personas en diferentes zonas de peligro volcánico.

La Figura 6.4 muestra la diferencia entre los valores de amenaza absoluta (a) y normalizada (b) de los distintos edificios volcánicos evaluados. Como se observa, el volcán Hudson, a pesar de tener un bajo valor de amenaza absoluta reflejo de su baja exposición, presenta un valor de amenaza normalizada muy elevada, debido a que la totalidad de personas e infraestructuras expuestas a sus peligros son susceptibles a ser afectadas por un alto nivel de peligro. Por lo que, la amenaza que imparte el volcán Hudson a las 7 personas expuestas a sus peligros es comparativamente mayor a la amenaza que otros volcanes imparten a su población. Por otro lado, el complejo volcánico Quetupillán evidencia un alto valor de amenaza absoluta, pero baja amenaza normalizada, debido a que es el centro eruptivo con mayor cantidad de personas expuestas a sus peligros, alcanzando un valor de exposición de 6.479. Sin embargo, el factor de peligro utilizado para calcular su amenaza absoluta, que corresponde a 12, es comparativamente menor que los utilizados para los

demás volcanes. Así, mientras más personas se expongan a los niveles de mayor peligro de un volcán y el factor de peligro asociado a este sea elevado, la amenaza absoluta será mayor.

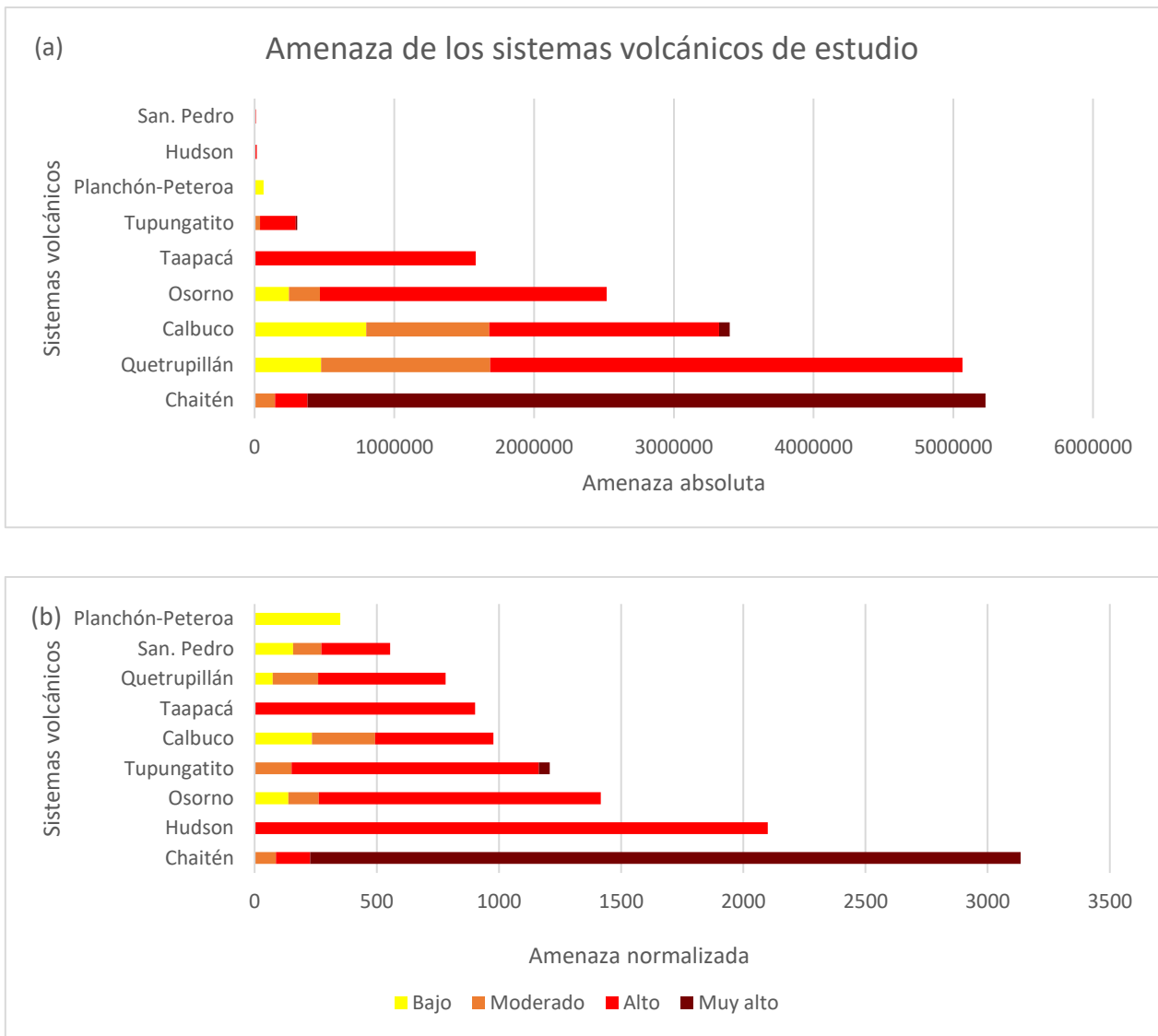


Figura 6.4. Valor de amenaza absoluta (a) y amenaza normalizada (b) por nivel de peligro en los distintos sistemas volcánicos.

En tanto, la amenaza normalizada en poblados corresponde al peligro ponderado de la zona poblada, e incluye la amenaza absoluta total del poblado que se evalúa y el total de activos de este, independiente si estos se encuentran expuestos a alguna zona de peligro volcánico. Por ejemplo, en la Figura 6.5, que muestra los valores de amenaza absoluta (a) y amenaza normalizada (b) en los distintos poblados, la localidad de Río Blanco-Colorado presenta un valor de amenaza absoluta muy bajo en comparación a su amenaza normalizada. Esto debido a que si bien, su exposición es bastante baja en comparación a otras localidades, casi la totalidad de sus activos evaluados

(personas e infraestructuras) se encuentran amenazadas por la zona de alto peligro del volcán Calbuco. Así, la amenaza normalizada en poblados, refleja el nivel de amenaza a la que está sometida la población, con respecto a la cantidad total de activos del poblado, independientemente si se encuentran expuestos o no a una zona de peligro.

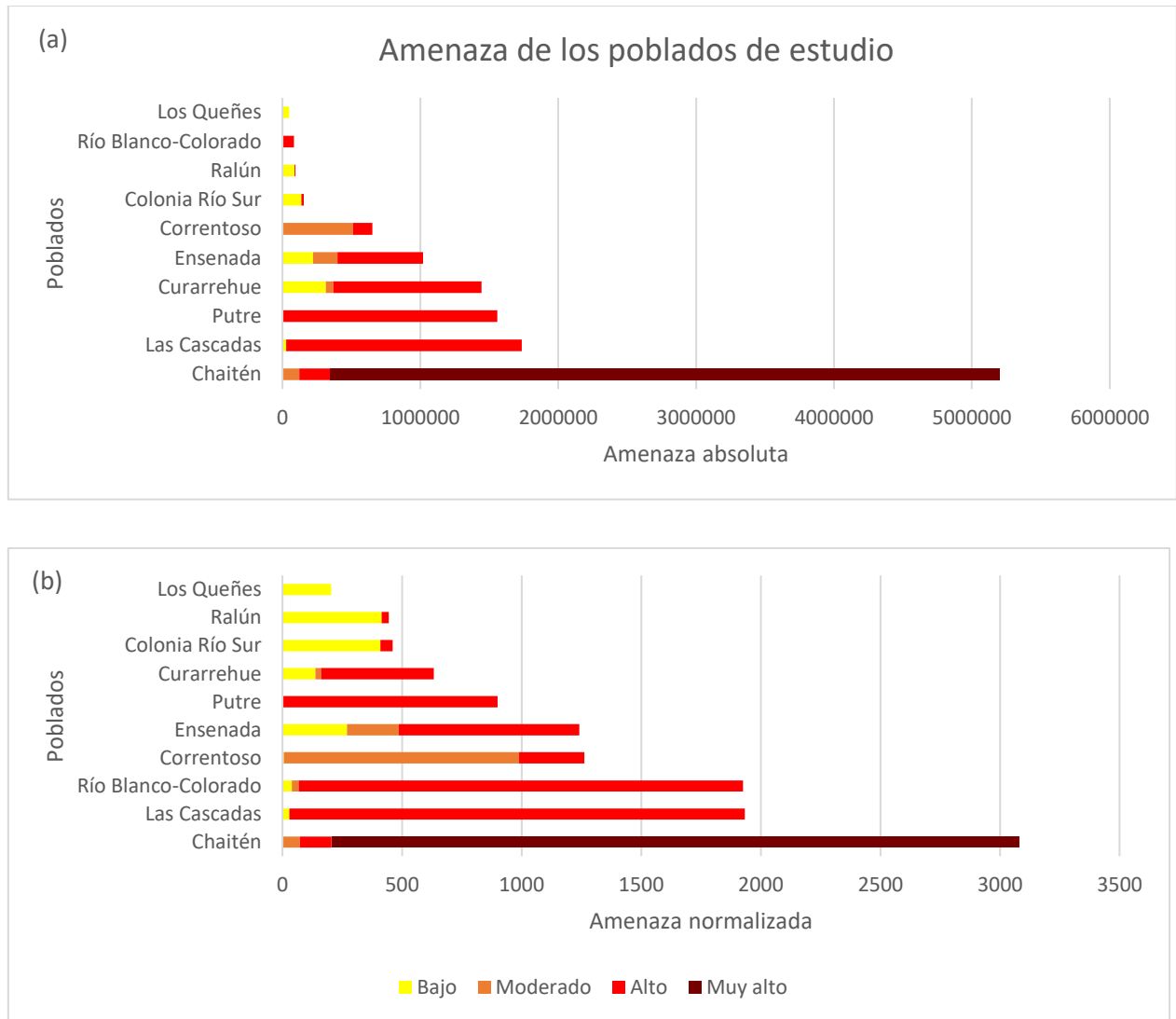


Figura 6.5. Valor de amenaza absoluta (a) y amenaza normalizada (b) por nivel de peligro en los distintos poblados.

En la Figura 6.6 se grafican los valores de amenaza absoluta versus amenaza normalizada en los sistemas volcánicos (Figura 6.6 (a)) y en los poblados afectados por los peligros derivados de estos (Figura 6.6 (b)). En el caso de los sistemas volcánicos, el coeficiente de correlación de Pearson corresponde a 0,4, y para los poblados este coeficiente alcanza los 0,77. Esto nos indica que la amenaza absoluta no es correlacionable con la amenaza normalizada.

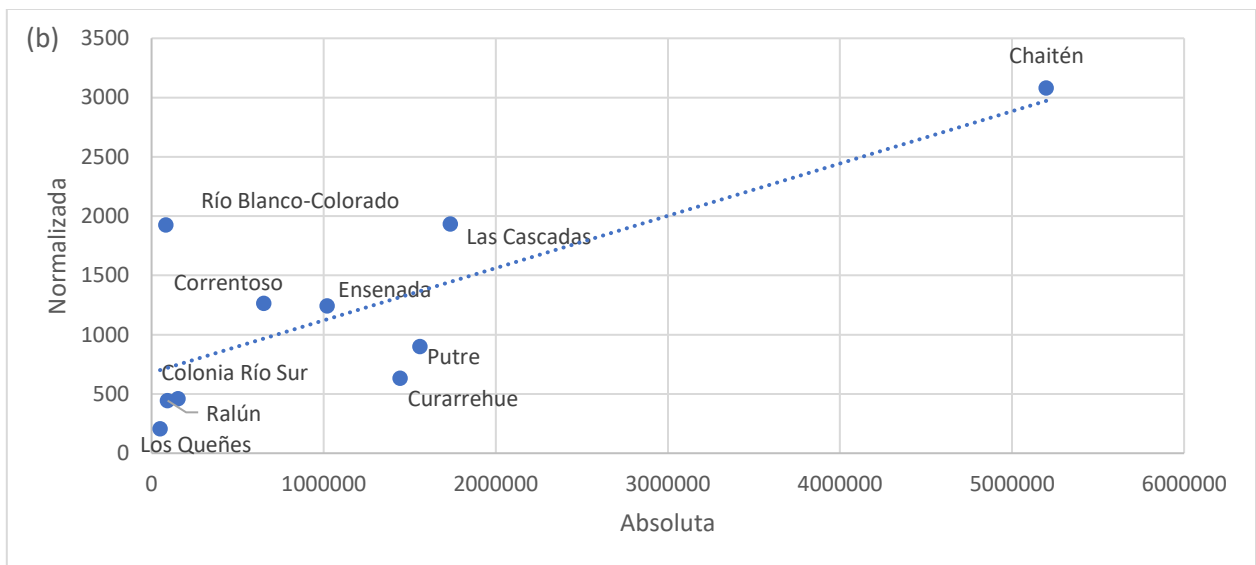
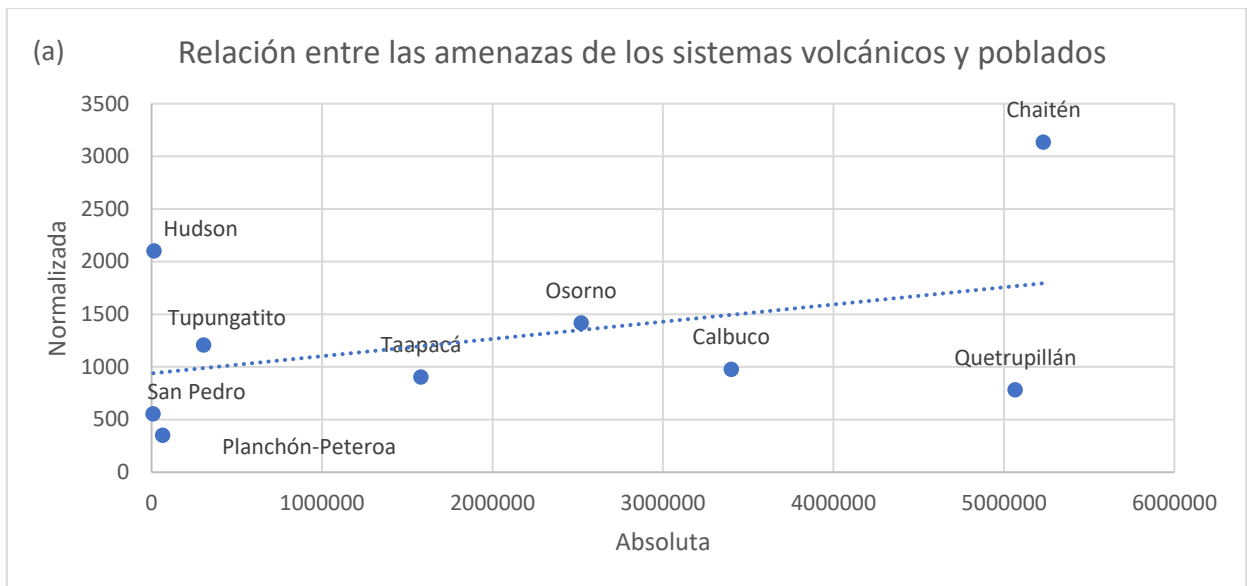


Figura 6.6. Relación entre la amenaza absoluta y normalizada en los sistemas volcánicos de estudio (a) y en los poblados aledaños a estos (b).

La información que entrega la amenaza absoluta y la amenaza normalizada es distinta pero complementaria, por lo que debe ser usada según las necesidades y requerimientos de los estudios o análisis realizados por las entidades a cargo de la planificación ante desastres. Por ejemplo, si se quiere saber que poblado concentra la mayor cantidad de elementos expuestos a algún nivel de peligro volcánico, se utiliza la amenaza absoluta. En tanto, si lo que se quiere saber es en que poblado los elementos son susceptibles a presentar mayor amenaza, independiente de su exposición, se utiliza la amenaza normalizada.

6.3. CONTRASTE ENTRE LA EXPOSICIÓN Y AMENAZA DE PERSONAS E INFRAESTRUCTURAS EN LOS SISTEMAS VOLCÁNICOS DE ESTUDIO

El detalle de la evaluación de la población en los distintos centros eruptivos se muestra en la Figura 6.7, en donde el 60% de los edificios volcánicos de estudio, que corresponden al Quetrupillán, Osorno, Taapacá, Chaitén, Tupungatito y Hudson, exponen a la mayor parte de su población a un alto o muy alto nivel de peligro (Figura 6.7 (a)). De ellos, los volcanes Chaitén y Quetrupillán tienen los puntajes de amenaza absoluta de la población más elevado (Figura 6.7 (b)). Por otro lado, los valores de amenaza normalizada (Figura 6.7 (c)), evidencian una diferencia en la posición de los volcanes Quetrupillán y Hudson con respecto a su amenaza absoluta. Esto se debe principalmente a que las 7 personas expuestas a los peligros del volcán Hudson se encuentran afectadas por un alto nivel de peligro, lo que explica su elevado valor de amenaza normalizada. En tanto, la población del complejo Quetrupillán, a pesar de tener el mayor valor de exposición, no es afectada en gran medida por zonas de muy alto peligro, como sí ocurre en el volcán Chaitén. Esto explica el elevado valor de amenaza absoluta, pero baja amenaza normalizada que presentan las personas afectadas por los peligros derivados del complejo Quetrupillán. En el volcán Chaitén por su parte, a pesar que la población presente valores relativamente bajos de exposición, evidencia la amenaza absoluta y normalizada más elevada entre todos los volcanes de estudio. Esto se debe a que ~85% de las personas expuestas a los peligros de este volcán son amenazadas por un muy alto nivel de peligro (1.427 personas).

La Figura 6.8 muestra el detalle de la exposición y amenaza volcánica a la que están sometidas las infraestructuras ubicadas en las cercanías de los centros eruptivos estudiados. El complejo Quetrupillán y los volcanes Calbuco y Osorno son los que evidencian mayor valor de exposición de infraestructuras (Figura 6.8 (a)). Sin embargo, el volcán Chaitén nuevamente es el que registra la mayor amenaza absoluta (Figura 6.8 (b)) y normalizada (Figura 6.8 (c)), debido a que ~60% de las infraestructuras expuestas son amenazadas por un muy alto nivel de peligro, donde se reconocen colegios, centros de salud, municipio, bomberos, carabineros; además los peligros de este volcán amenazan la ruta nacional longitudinal 7, que posee el mayor puntaje de exposición entre los tipos de rutas.

Estos gráficos reflejan la dependencia de las personas en la asignación del valor de amenaza, ya que los centros eruptivos cuya población se impone con los mayores valores de amenaza absoluta, son los que además lideran el ranking de amenaza absoluta total (Tabla 5.21). Así mismo, se observa una relación entre los puntajes de amenaza normalizada de las personas y el ranking de amenaza normalizada total (Tabla 5.25).

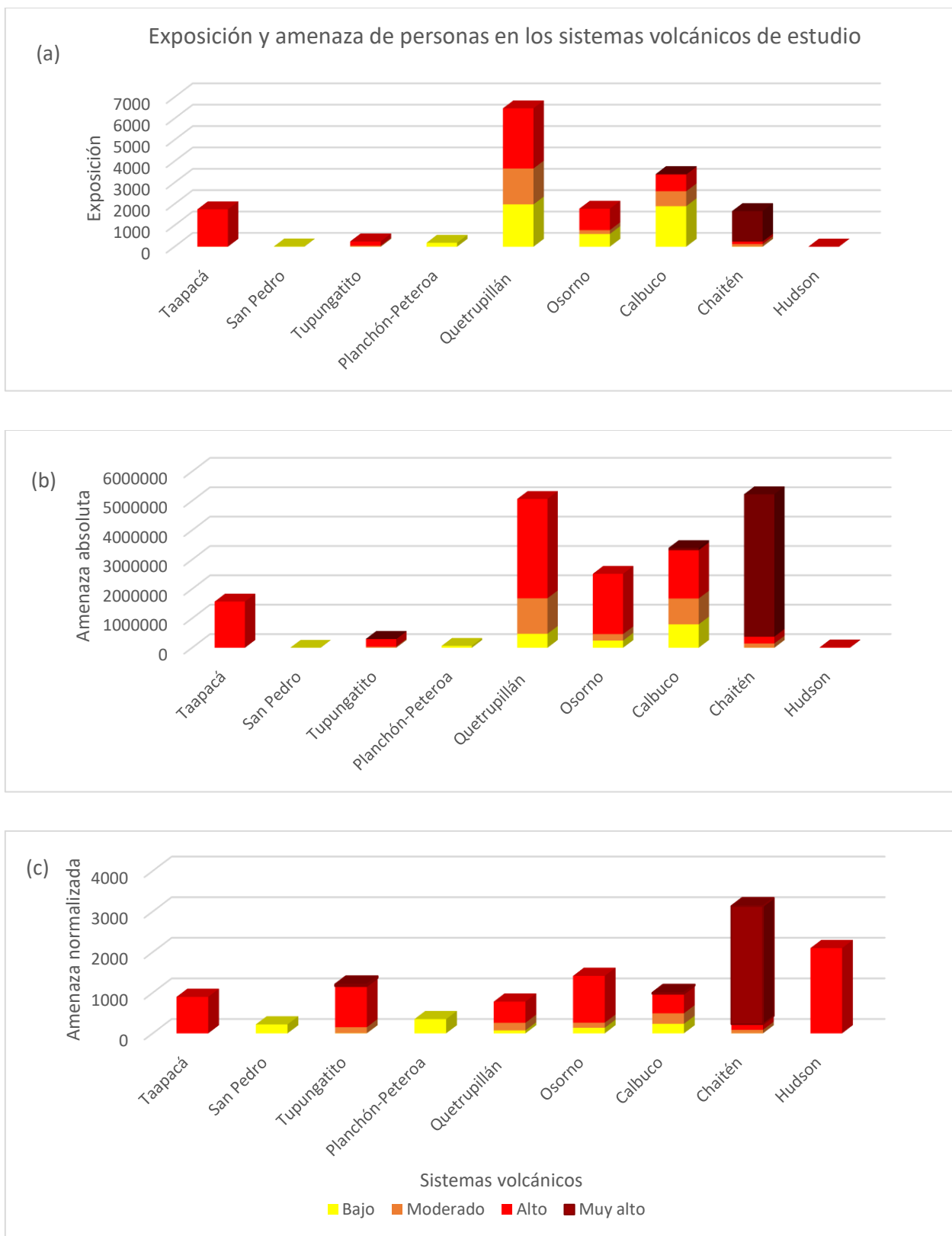


Figura 6.7. Valores de exposición (a), amenaza absoluta (b) y amenaza normalizada (c) de la población afectada por los distintos niveles de peligro de los centros volcánicos de estudio, usando el factor de peligro.

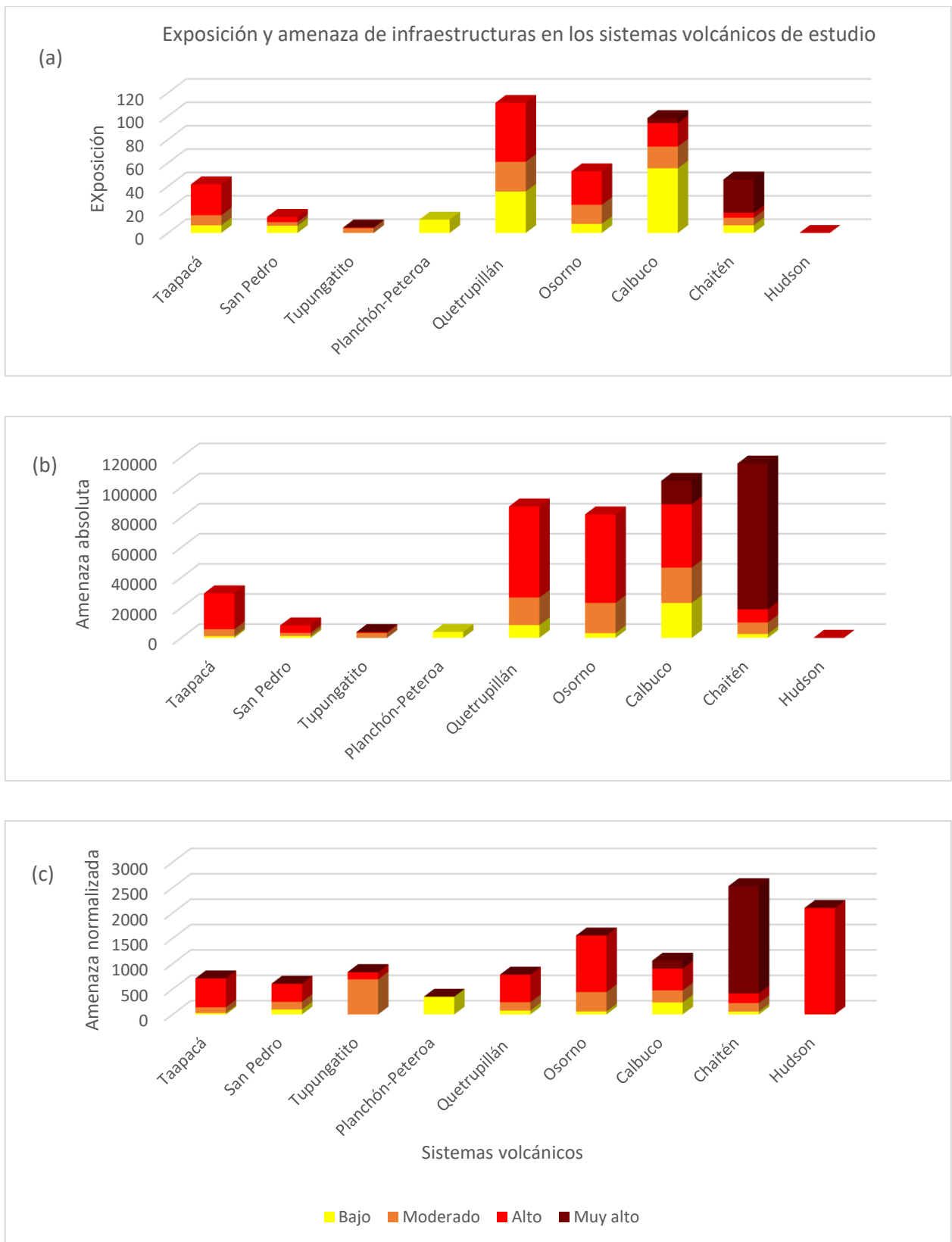


Figura 6.8. Valores de exposición (a), amenaza absoluta (b) y amenaza normalizada (c) de las infraestructuras afectadas por los distintos niveles de peligro de los centros volcánicos.

6.4. CONTRASTE ENTRE LA EXPOSICIÓN Y AMENAZA DE PERSONAS E INFRAESTRUCTURAS EN LOS POBLADOS DE ESTUDIO

En la Figura 6.9 se muestra el detalle de la evaluación de exposición y amenaza de la población que habita en las distintas localidades que son susceptibles a ser afectadas por los peligros provenientes de los volcanes de estudio. En la Figura 6.9 (a) se observa que Putre, Las Cascadas y Río Blanco-Colorado son las localidades donde más del 90% de su población se encuentra expuesta a la zona de alto peligro volcánico por parte de los centros eruptivos Taapacá, Osorno y Calbuco respectivamente; obteniendo valores de amenaza absoluta (Figura 6.9 (b)) y/o normalizada (Figura 6.9 (c)) más elevados que el resto de los poblados, a excepción de la localidad de Chaitén, donde más del 85% de su población expuesta se encuentra amenazada por la zona de muy alto peligro por parte del volcán homónimo. Por esta razón se adjudica el mayor valor de amenaza absoluta y normalizada, a pesar de no presentar el mayor valor de exposición de personas con respecto a los demás poblados.

El poblado Río Blanco-Colorado representa un ejemplo del porqué la amenaza absoluta y normalizada no son comparables. Ya que si bien, esta localidad presenta una baja amenaza absoluta, debido a la baja cantidad de habitantes (43 personas) expuestos a los peligros del volcán Calbuco, 38 de ellos son amenazados por un alto nivel de peligro, lo que explica su tan elevada amenaza normalizada.

Por otro lado, a Curarrehue se le atribuye el valor de exposición de habitantes (2.283 personas) más alto entre todos los poblados estudiados, pero debido a que más del 55% de ellos se encuentran amenazados por un bajo nivel de peligro por parte del complejo volcánico Quetrupillán, su amenaza absoluta y normalizada disminuye con respecto a las demás localidades.

Al igual como ocurre a escala regional en los centros eruptivos de estudio, a escala local en los poblados se evidencia una similitud entre los valores de amenaza absoluta total (Tabla 5.22) y amenaza normalizada total (Tabla 5.26), con los valores de amenaza absoluta (Figura 5.23 (b)) y amenaza normalizada (Figura 5.23 (c)) de la población que habita estas localidades.

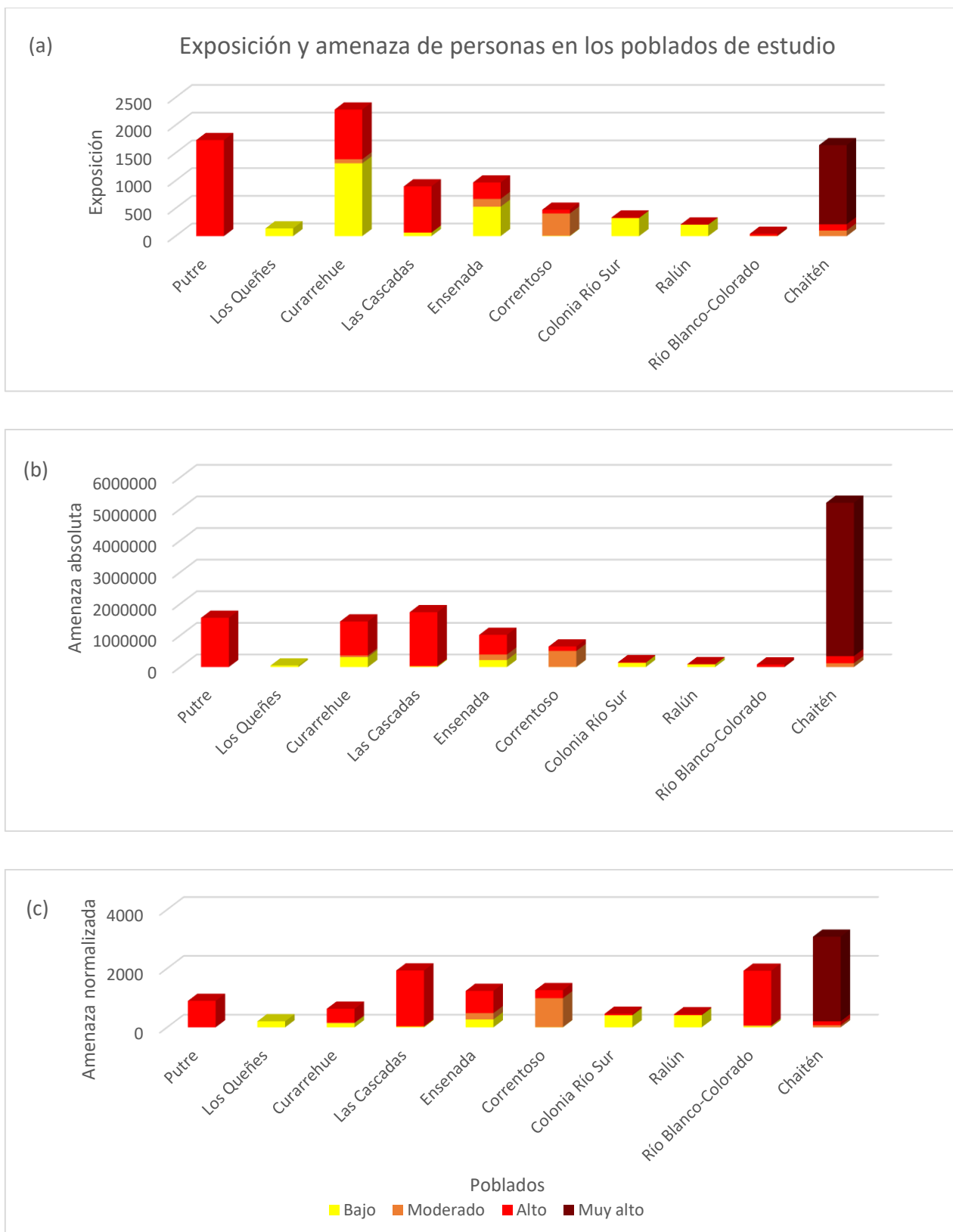


Figura 6.9. Valores de exposición (a), amenaza absoluta (b) y amenaza normalizada (c) de la población ubicada en los poblados y afectada por los distintos niveles de centros volcánico, usando el factor de peligro.

En la Figura 6.10 se desglosan los puntajes de exposición y amenaza volcánica de las infraestructuras localizadas en los poblados aledaños a los centros eruptivos de estudio. Donde, al igual que en la evaluación de personas en los poblados, las localidades de Putre, Las Cascadas y Río Blanco-Colorado son los poblados donde más del 95% de sus infraestructuras expuestas se encuentran amenazadas por un alto nivel de peligro volcánico por parte de los centros eruptivos Taapacá, Osorno y Calbuco respectivamente (Figura 6.10 (a)), reflejando además elevados valores de amenaza absoluta (Figura 6.10 (b)) y/o amenaza normalizada (Figura 6.10 (c)).

En tanto, el 85% de las infraestructuras expuestas en el poblado de Chaitén, son afectadas por la zona de muy alto peligro del volcán homónimo, destacándose entre ellas las infraestructuras críticas sociales, de respuesta y de transporte de alto valor, como lo son los aeródromos y la ruta nacional 7. Por esta razón esta localidad se adjudica los valores de amenaza absoluta y amenaza normalizada más elevados.

Por otro lado, a Ensenada se le atribuye el valor de exposición de infraestructuras más alto entre todos los poblados estudiados, y valores de amenaza absoluta y normalizada elevados. Esto debido principalmente a que esta localidad se sitúa en un amplio abanico lahárico, donde las zonas de peligro de los volcanes Osorno y Calbuco se traslapan. Así, el sector norte de Ensenada es afectada por los niveles de bajo y moderado peligro del volcán Osorno; y el poblado en su totalidad es amenazado por los niveles de bajo, moderado y alto peligro del volcán Calbuco, donde además de exponer a infraestructuras críticas sociales y de respuesta, se exponen infraestructuras de energía y de transporte de gran valor, como lo son las centrales hidroeléctricas, aerodromos y la ruta internacional 225-CH, además de otros caminos regionales principales y provinciales, comunales y de acceso.

Por su parte, la localidad de Curarrehue a pesar de presentar el segundo valor de exposición de infraestructuras más elevado con respecto a los demás poblados, evidencia valores comparativamente bajos de amenaza absoluta y normalizada. Esto se debe a que la totalidad de sus infraestructuras de respuesta (carabineros, bomberos y municipios), establecimientos educacionales y la mayor longitud de rutas (caminos regionales, provinciales, comunales y de acceso; y calles) se encuentran amenazados por la zona de bajo peligro del complejo volcánico Quetrupillán.

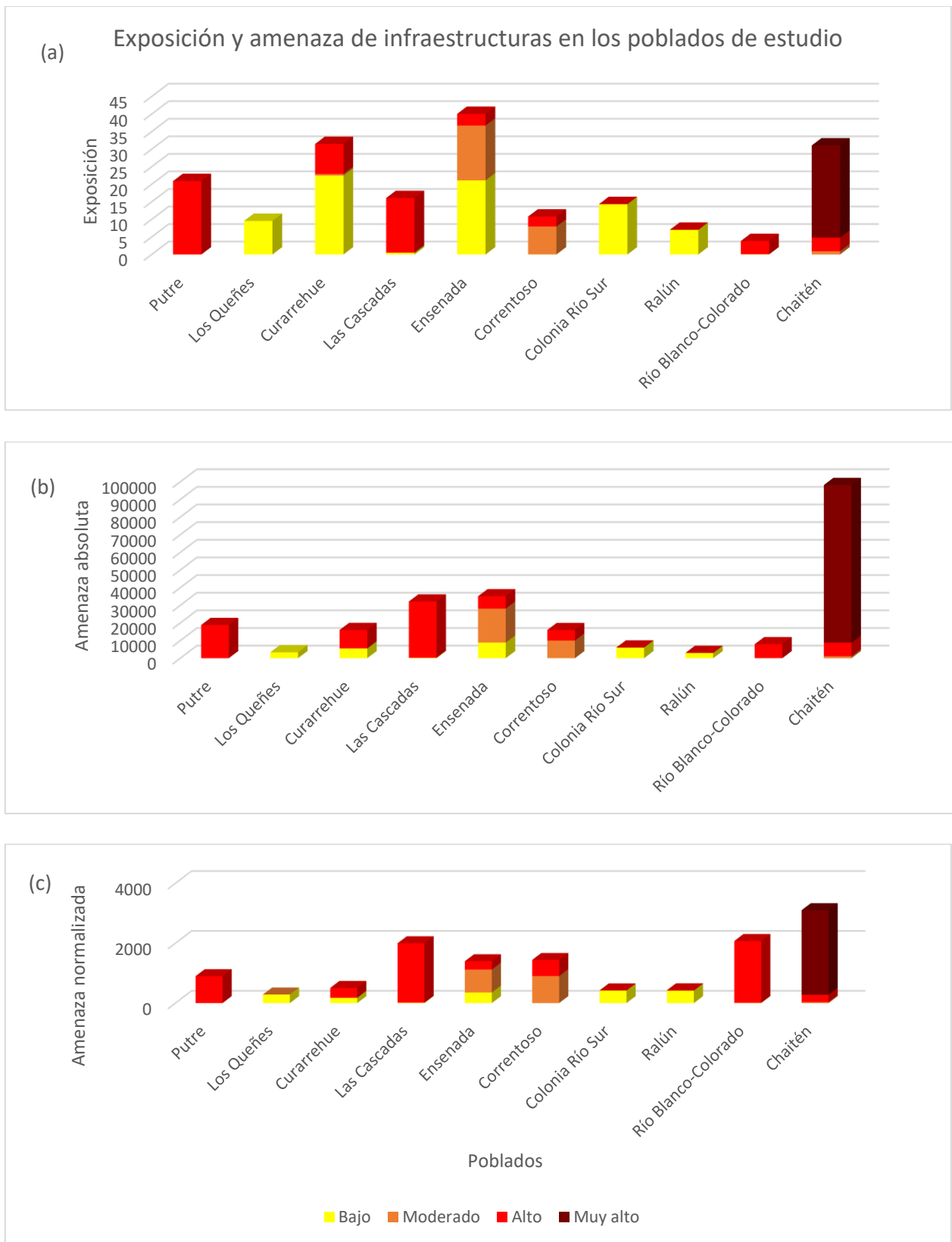


Figura 6.10. Valores de exposición (a), amenaza absoluta (b) y amenaza normalizada (c) de las infraestructuras ubicadas en los poblados y afectadas por los distintos niveles de peligro volcánico.

6.5. RELACIÓN ENTRE LA EXPOSICIÓN DE PERSONAS E INFRAESTRUCTURAS

Como se ha comentado en los capítulos anteriores, la población corresponde al activo al que se le ha asignado los mayores valores de exposición (Figura 6.11). Por lo que, bajo esa premisa, el valor de amenaza total de un volcán depende en mayor medida de la cantidad de personas afectadas por algún nivel de peligro volcánico.

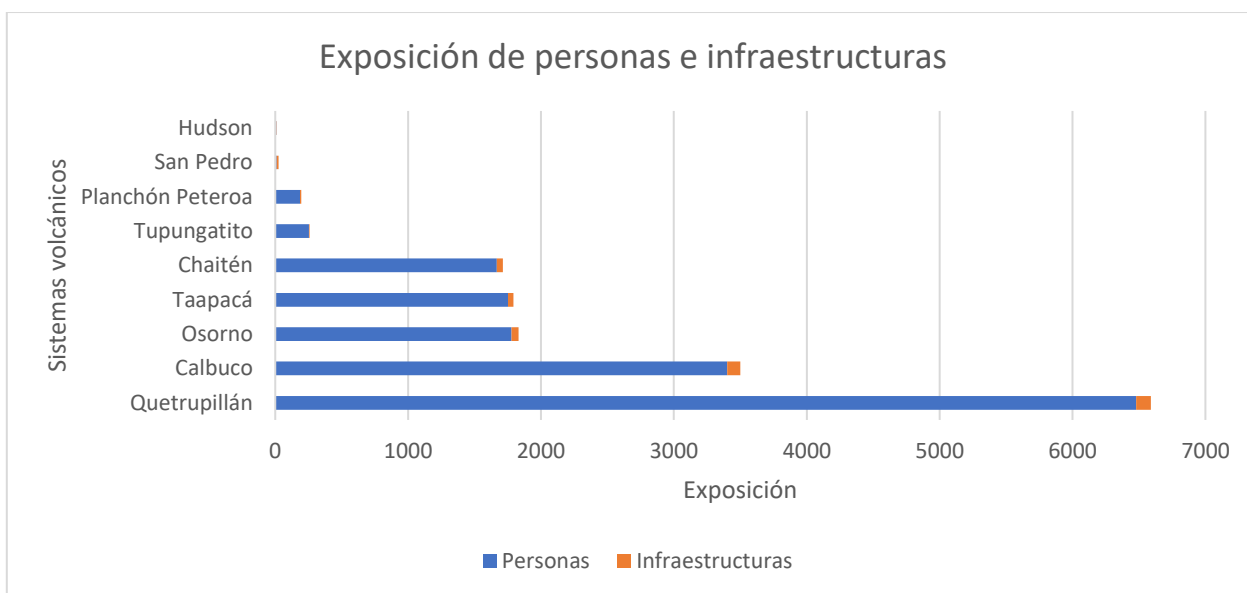


Figura 6.11. Personas e infraestructuras expuestas a los peligros de los sistemas volcánicos de estudio.

En la Figura 6.12 se observa que las personas y las infraestructuras representan una relación lineal con un coeficiente de correlación de Pearson que alcanza los 0,95. Con esto es común pensar que mientras más personas habiten un territorio, más viviendas e infraestructuras críticas serán necesarias para satisfacer las necesidades básicas de esa población.

Así, en las zonas con mayor superficie, donde habitan más personas, también existirían más centros educacionales, de salud y servicios preparados para asistir emergencias en caso de alguna crisis. Además, la conectividad suele ser mayor donde existe mayor aglomeración de personas, como en las localidades urbanas, donde predominan las rutas nacionales e internacionales; en comparación con las localidades más rurales, donde predominan las calles y los caminos regionales provinciales, comunales y de acceso, cuyo puntaje de exposición es bastante menor en comparación al de las demás rutas. Sin embargo, esto no siempre es determinante, ya que en la realidad los valores de exposición de personas e infraestructuras no son comparables, por tratarse de elementos totalmente diferentes.

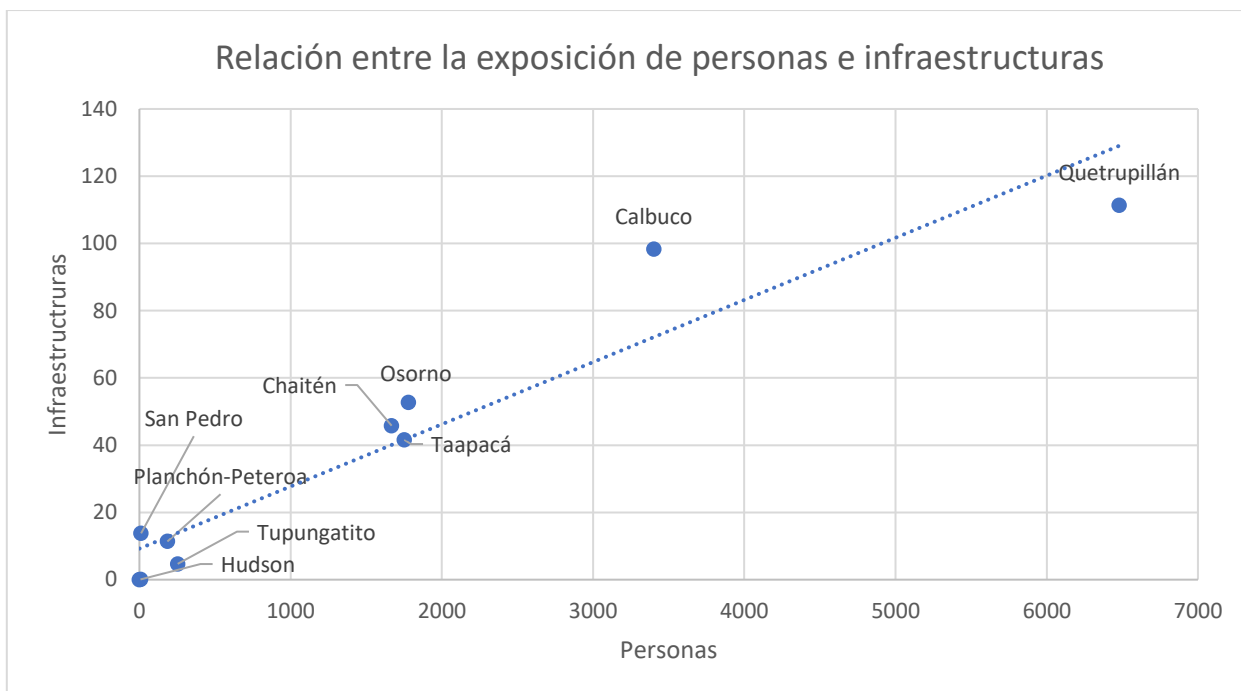


Figura 6.12. Relación entre la exposición de personas e infraestructuras en los sistemas volcánicos de estudio.

6.6. DISTRIBUCIÓN DE LAS INFRAESTRUCTURAS CRÍTICAS

En la Figura 6.13 se observa la distribución de la exposición de las diferentes infraestructuras críticas sociales, de respuesta, de energía y de transporte tanto en centros eruptivos como en los poblados aledaños a estos. Como bien se detalla, los centros de educación poseen el mayor puntaje de exposición con respecto a los demás elementos expuestos y le siguen los centros de salud. Esto tiene mucho sentido si se considera que tanto las escuelas, colegios, postas y hospitales entregan servicios básicos y prioritarios a la comunidad, por lo que ante una crisis, es vital tener estas infraestructuras a disposición, principalmente en lo que respecta a los centros asistenciales de salud. Otros activos que destacan por su importancia ante una emergencia volcánica son las rutas y puentes, ya que es indispensable tener un acceso liberado y seguro para transitar por estas vías de evacuación ante cualquier emergencia. De esta forma, si es que uno de estos elementos se viera perjudicado por un peligro volcánico, viéndose inhabilitado su uso, definitivamente aumentaría la vulnerabilidad de la población amenazada.

Este punto es sumamente relevante en temas de planificación territorial y relaciones de costos y beneficios. Ya que, por un lado, a medida que existan más infraestructuras expuestas a algún peligro volcánico, mayor será la amenaza, lo que reflejará mayores costos de recuperación e inversión en el caso de que se vean afectadas negativamente por una eventual erupción volcánica. Sin embargo, en planes de emergencia lo más conveniente es tener muchas infraestructuras críticas a disposición que permitan combatir y dar una pronta respuesta a una emergencia volcánica.

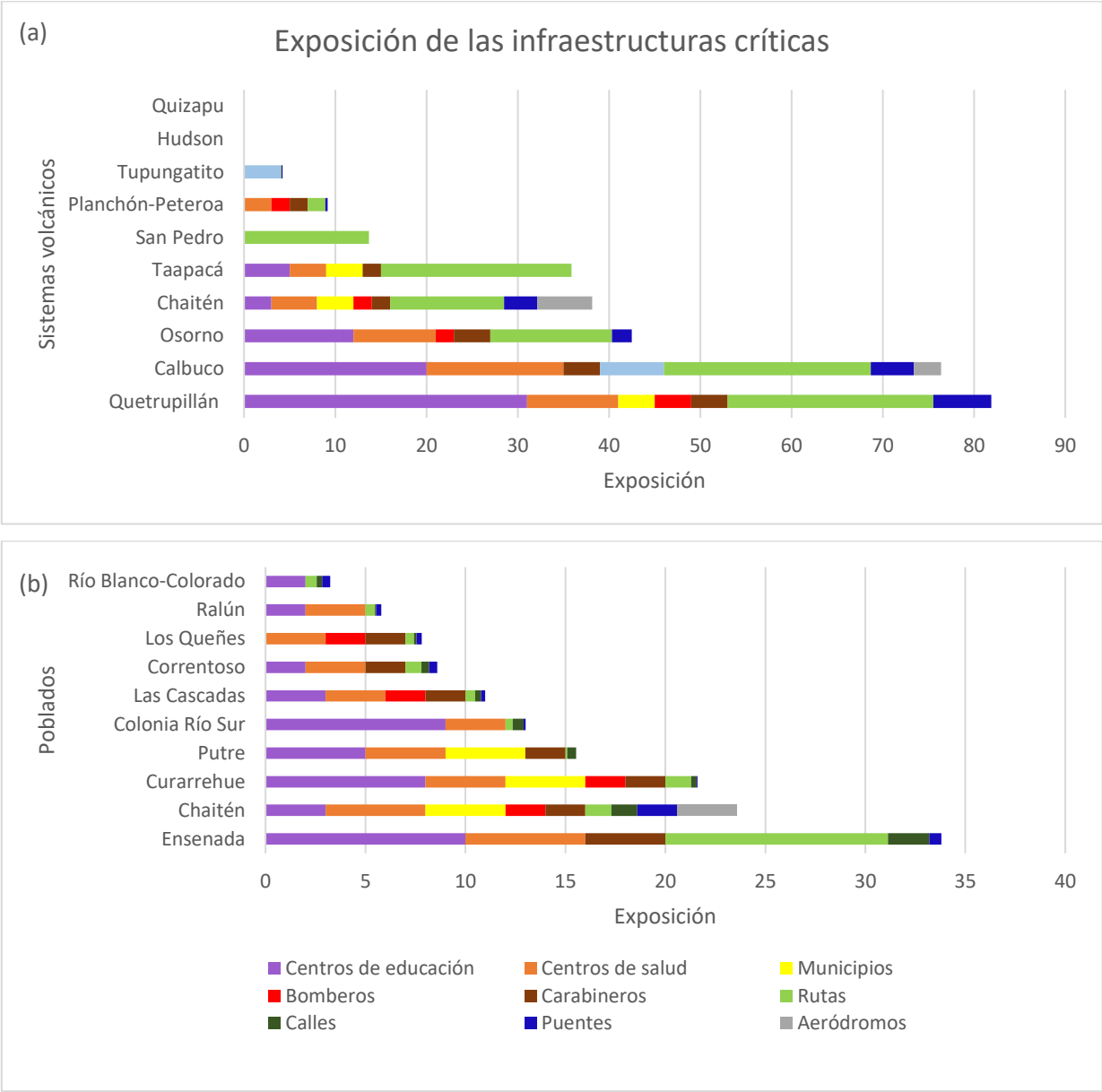


Figura 6.13. Detalle de los valores de exposición de infraestructuras críticas en sistemas volcánicos (a) y poblados (b).

6.7. IMPLICANCIA Y RELEVANCIA DEL FACTOR DE PELIGRO Y LA EXPOSICIÓN TOTAL EN LA AMENAZA VOLCÁNICA

Como se ha hablado a lo largo de este escrito, la amenaza depende tanto del valor de exposición total de los activos evaluados, como del nivel de peligro al que estén sometidos, además del factor de peligro del volcán de estudio. Bajo esta premisa, en este apartado se pretende discutir cual es el rol que juegan las variables de exposición y factor de peligro en la ecuación de la amenaza volcánica, y cuál de ellas es la que más influye en su valor. Para esto se grafican los valores de exposición total y los factores de peligro en relación a la amenaza absoluta de cada volcán, con el objetivo de comparar su influencia.

La Figura 6.14 evidencia una correlación positiva entre la exposición total y la amenaza volcánica absoluta, exceptuando algunos casos puntuales como lo que ocurre con el volcán Chaitén, en donde se esperaría un mayor valor de exposición total; y el complejo Quetrupillán, en donde se esperaría un menor puntaje de exposición considerando el valor de amenaza absoluta en cada caso. Con respecto al volcán Chaitén esto se explica debido a que si bien, la cantidad de elementos expuestos es comparativamente menor a la de otros centros volcánicos, el 85% del total de estos activos se encuentra amenazados por la zona de muy alto peligro. En tanto, los activos expuestos a los peligros del complejo Quetrupillán se encuentran amenazados en proporciones más equitativas por los niveles de bajo, moderado y alto peligro volcánico: 30%, 25% y 45% respectivamente.

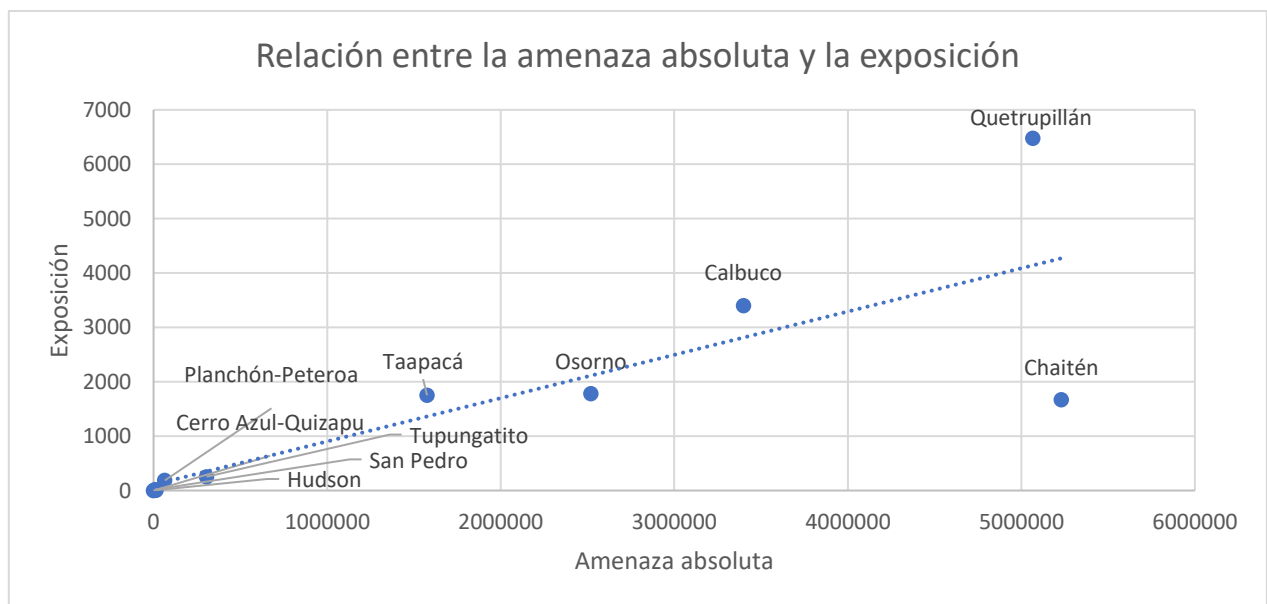


Figura 6.14. Valores de exposición total comparados con los valores de amenaza absoluta total en los sistemas volcánicos de estudio.

Por otro lado, en la Figura 6.15, no pareciera observarse ningún tipo de tendencia entre el factor de peligro y la amenaza absoluta de cada volcán. Siendo que lo que se espera es que, a mayor amenaza, mayor sea el factor de peligro correspondiente a cada centro eruptivo. Pero hay disyuntivas, como el caso del complejo Quetrupillán, cuyo factor de peligro (12) es comparativamente bajo con respecto los demás centros eruptivos de estudio, pero presenta el segundo valor de amenaza absoluta más elevado. En contraste a lo que ocurre con el volcán Hudson y el complejo Cerro Azul-Quizapu, donde ambos poseen el mayor factor de peligro (21) registrado entre todos los edificios volcánicos sometidos a la evaluación, pero sus amenazas absolutas son comparativamente más bajas, llegando a ser incluso cero para el caso del complejo Cerro Azul-Quizapu.

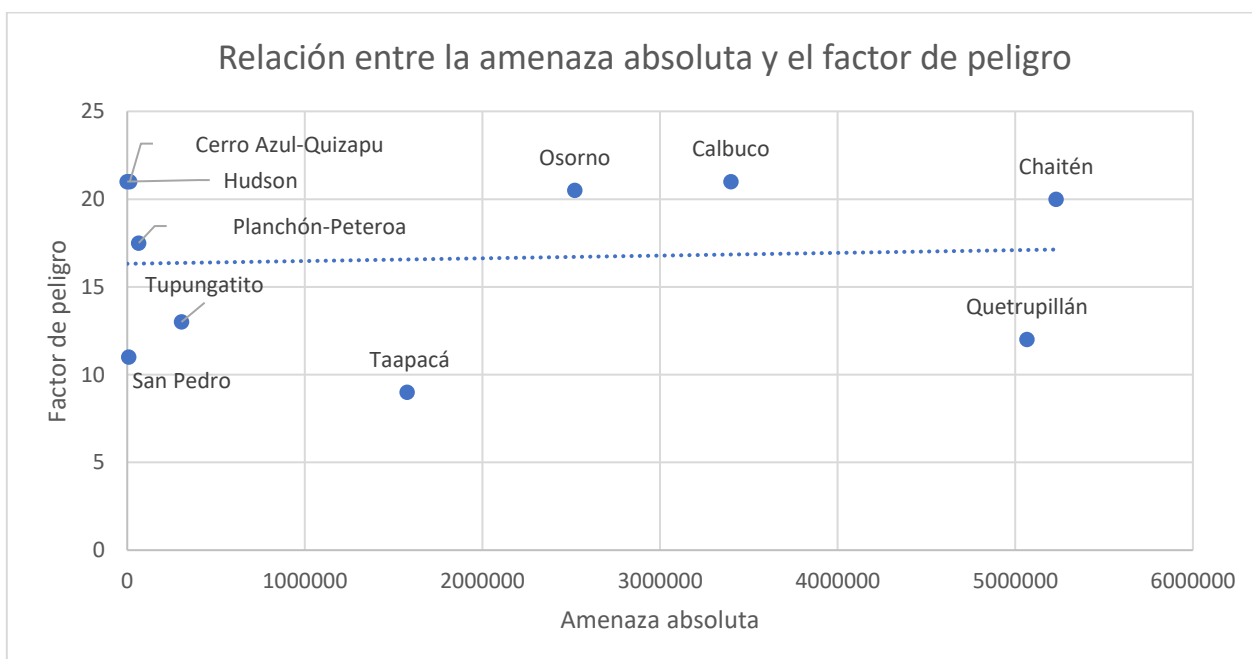


Figura 6.15. Factores de peligro comparado con los valores de amenaza absoluta total en los sistemas volcánicos de estudio.

6.8. LIMITACIONES EN LA EVALUACIÓN DE AMENAZA VOLCÁNICA

Es importante destacar que los resultados de esta evaluación de amenaza volcánica es una aproximación semicuantitativa. Si bien, la metodología utilizada está inspirada en la desarrollada por (NVEWS), y utiliza información respaldada y proporcionada tanto por el SERNAGEOMIN como el Censo (2017), sigue presentando ciertas limitaciones.

La primera y quizá más importante, es la diferencia entre los mapas de peligro utilizados. Esto debido a que la metodología utilizada para su elaboración, difiere entre uno y otro mapa, dependiendo principalmente de los autores y el año de publicación. Esto se refleja principalmente en las diferencias para representar la caída de material piroclástico. Por ejemplo, en los complejos volcánicos Quetrupillán y Planchón-Peteroa se representan con envolventes que limitan externamente las zonas que pueden ser afectadas por la caída de piroclastos, según su diámetro máximo. Por su parte, las envolventes de los volcanes Osorno y Calbuco delimitan el área que puede ser afectada por la caída de piroclastos, según el espesor de acumulación del manto piroclástico. En tanto que en los volcanes San Pedro, Tupungatito, Chaitén, Hudson y el complejo Cerro Azul-Quizapu se representan mediante isópacas que indican la probabilidad anual de acumulación de, al menos, 10 cm de material piroclástico, dado un escenario eruptivo específico para cada volcán. Por otro lado, en el complejo volcánico Taapacá se representa por una sola envolvente que delimita el área que puede ser afectada por caída de piroclastos. Además, cada mapa presenta distintas definiciones para los niveles de peligro volcánico. Por esto fue necesario hacer un preprocesamiento de los datos con el objetivo de redigitalizar los mapas de peligro y homogenizar la información para trabajar con un mismo método, reduciendo al máximo el error que podrían evidenciar estas limitantes. Sin embargo, en algunos casos esto podría conllevar a sobrevalorar o infravalorar la amenaza en algunos centros eruptivos.

Otra limitante fue la información acotada que se tenía en ciertos casos. Por ejemplo, en la práctica, la historia eruptiva para muchos volcanes está incompleta, es limitada y/o varía según cada autor. Razón por la cual se restringió a utilizar los registros históricos proporcionados por la base de datos del Global Volcanism Program de Smithsonian Institution y por Petit-Breuilh (2004). Por otro lado, y particularmente para el volcán Hudson, su aislada ubicación y difícil acceso impidió obtener información por parte del Censo (2017), y fue necesario consultar la cantidad de personas que habitan en la desembocadura del río Huemules con profesionales del SERNAGEOMIN, quienes eran los únicos que manejaban esa información.

Otra limitación que podría considerarse en el estudio está relacionada con el análisis de edificaciones en las zonas rurales. Comúnmente se utilizó una escala 1:5000, que permitía ver los techos de las viviendas con claridad necesaria a la vez que se observa un área lo suficientemente extensa. Sin embargo, en algunos casos fue necesario observar con mayor detalle, a una escala 1:2500 o 1:1250, pero finalmente la escala de evaluación queda a criterio del analista, y en muchos casos diferenciar una vivienda de un establo o una bodega no es tan trivial. Por lo que las delimitaciones de las construcciones quedan al criterio del usuario y depende de su interpretación.

A pesar de que para la escala de este trabajo el detalle representado en la distribución de los elementos expuesto reduce de forma significativa el error con respecto a las entidades censales originales presentadas por el INE (2018), el asumir que tanto las personas como las viviendas se distribuyen de manera uniforme dentro de las entidades censales, puede generar cierta incertidumbre sobre la ubicación de la población. Además, la información proporcionada por el Censo (2017) solo considera la población permanente, por lo que la población flotante quedaría fuera de la evaluación de amenaza volcánica.

7. CONCLUSIONES

El marco geológico de Chile lo posiciona dentro de los países con más volcanes activos del mundo. Esto sumado al crecimiento demográfico y de asentamientos humanos en el área de influencia del volcán constituye el problema más difícil de manejar en el caso de una emergencia volcánica, abarcando implicancias económicas y políticas importantes. Por esta razón, surge la necesidad de mantener un constante monitoreo y evaluaciones actualizadas tanto del nivel de peligro como de amenaza que los centros eruptivos del país imparten a la población.

Si bien existen estudios sobre la peligrosidad de los centros volcánicos, la evaluación de la amenaza sigue siendo un tema menos abordado. Es por esto que esta evaluación, al proporcionar una aproximación certera de la amenaza que cada centro eruptivo imparte a las personas, viviendas e infraestructuras críticas expuestas a algún nivel de peligro, les permite a las autoridades gubernamentales a cargo del manejo de planes de emergencia, contar con información oportuna para guiar la implementación de programas de reducción de riesgo volcánico.

La metodología utilizada en este trabajo permitió cuantificar el nivel de exposición de la población e infraestructuras, a través de un análisis detallado de distribución espacial que incorpora datos preprocesados del censo (2017) y los mapas de peligro de los volcanes de estudio elaborados por el SERNAGEOMIN, mediante el uso de herramientas SIG.

La cuantificación de las zonas de peligro determinadas en estudios anteriores, posibilitó la asignación de un puntaje a cada nivel de peligro (bajo, moderado, alto, muy alto), según la leyenda de los mapas de peligro. Así, la integración del valor de exposición de personas e infraestructuras con el valor de la zona de peligro que las afecta, permite evaluar el grado de amenaza que cada centro eruptivo imparte a las localidades aledañas.

La comparación de la amenaza entre centros eruptivos y las localidades expuestas a sus peligros, fue posible gracias a la incorporación de un factor (peligro o recurrencia), que permite informar sobre el peligro relativo que cada volcán presenta respecto a otros. Ya que los niveles de peligro informados en la leyenda de cada mapa de peligro del SERNAGEOMIN no son comparables por sí solos, porque cada uno tiene un nivel de peligrosidad definido por criterios específicos. La elección del factor de peligro por sobre el factor de recurrencia para poder comparar niveles de peligrosidad entre volcanes, se debe a que este incluye tanto la recurrencia eruptiva de los edificios volcánicos como otras características volcanológicas que describen el peligro relativo de un

volcán, y que proviene de una metodología objetiva, previamente aceptada y realizada por el SERNAGEOMIN.

Los resultados de este estudio son parte de una contribución mayor, que constituye una versión más detallada de la evaluación y clasificación de los 30 volcanes más activos del país con respecto al ranking de riesgo específico publicado por el SERNAGOEMIN (2019). Además, esta investigación se convierte en la primera evaluación de amenaza de poblados susceptibles a ser afectados negativamente por peligros derivados de volcanes aledaños.

La categorización de la amenaza volcánica permitió la creación de un ranking para poblados y otro para toda la población que puede ser afectada por los peligros de los volcanes de estudio. Donde los volcanes con mayor puntaje en el ranking son los que requieren más monitoreo en Chile, por ende, se consideran volcanes ideales para realizar sobre ellos mapas de peligro volcánico microzonificados, los cuales son representaciones de alto detalle concebidos para el apoyo de labores de ordenamiento territorial por parte de organismos competentes, que apuntan a prevenir que la población se establezca en áreas que estén expuestas a tales amenazas.

En este caso, el poblado expuesto que representa una mayor amenaza absoluta y normalizada es Chaitén, siendo el volcán homónimo el centro eruptivo que impone la mayor amenaza dentro de todos los volcanes estudiados en este trabajo. Estos resultados pueden asistir a la asignación prioritaria de recursos para la gestión de riesgo de desastres, con el fin de tomar decisiones enfocadas en el resguardo de la población.

La representación cartográfica de la amenaza volcánica es fundamental para la toma de decisiones. Es por esto que, para facilitar el entendimiento, los resultados de esta evaluación son consignados sobre mapas que integran esta amenaza e identifican zonas susceptibles de verse afectadas negativamente por diferentes procesos volcánicos, considerando áreas prioritarias donde se necesita especial atención de las entidades públicas para mitigar el riesgo causado por las amenazas naturales.

Si bien, existe una relación entre la cantidad de personas expuestas a la zona de peligro de un volcán y su amenaza, los significados de exposición y amenaza no son sinónimos. La diferencia radica en el nivel de peligro volcánico al que están sometidos los elementos expuestos. Esto se refleja en el caso del volcán Chaitén y el complejo volcánico Quetrupillán, donde este último posee el mayor valor de exposición de todos los conos volcánicos de estudio, pero presenta una amenaza menor que el volcán Chaitén, que presenta el mayor valor de amenaza entre todos los centros eruptivos, pero su valor de exposición no es tan elevado.

Por otro lado, la actividad o peligrosidad de un centro eruptivo tampoco define su valor de amenaza. Un claro ejemplo es el complejo volcánico Cerro Azul-Quizapu, ya que a pesar que su erupción de 1932 fue la más grande registrada en el país, y una de las más grandes de Sudamérica, este edificio volcánico no imparte ningún tipo de amenaza, debido a que en su perímetro no se registra ningún activo (personas, viviendas e infraestructuras críticas) expuesto a peligros derivados de este complejo. Para que exista amenaza es necesario que algún elemento se encuentre expuesto a un peligro volcánico.

Es importante destacar que la amenaza absoluta depende tanto de la cantidad de personas e infraestructuras que se encuentren expuestas a un nivel de peligro, como del valor de esa zona de peligro. En tanto que la amenaza normalizada es independiente de la exposición, por lo que mientras las personas e infraestructuras se concentren en las zonas de mayor peligro, presentarán una mayor amenaza. De esta forma la amenaza normalizada o peligro ponderado indica el nivel de peligro volcánico al que están sometidos los elementos expuestos, o donde estos están expuestos a una mayor amenaza. Por lo tanto, la información que entregan ambas amenazas es distinta pero complementaria, por lo que debe ser usada según las necesidades y requerimientos de los estudios o análisis realizados por las entidades a cargo de la planificación ante desastres.

A pesar de que la metodología de evaluación de amenaza propuesta representa una mejora en el detalle con respecto a la proporcionada por el SERNAGEOMIN (2019), sigue siendo una aproximación semicuantitativa del valor de amenaza volcánica, limitada por: la información entregada en los distintos mapas de peligro volcánico, como las envolventes (máxima extensión que puede ser afectada por procesos volcánicos de cierta magnitud y recurrencia) que no siempre son consistentes en todos los mapas, dificultando la comparación entre ellos; el limitado registro eruptivo que existe para algunos volcanes. Sin embargo, con el preprocesamiento de los datos, la redigitalización de los mapas de peligro y la incorporación del factor de peligro a la ecuación de amenaza, se logró minimizar estas limitantes, obteniendo valores certeros de exposición y amenaza volcánica.

Los valores de amenaza presentados a modo de ranking están sujetos a revisión a medida que exista más información disponible. Es por esto que la base de datos geoespacial generada es un producto que posibilita la continua actualización, modificación y complementación de la información, que puede ser utilizada por distintas entidades como una herramienta para la elaboración de planes de desarrollo, acción, vigilancia, organización y educación para reducir los efectos de las amenazas volcánicas.

Si bien en este trabajo no se evalúa la vulnerabilidad específica de los elementos amenazados, ya que no se consideran factores económicos ni administrativos, los resultados sí representan un avance y una premisa para un futuro análisis de riesgo, por lo que estarán a disposición como insumos para próximos trabajos sobre estos tópicos.

La mejor manera de mitigar los efectos de una erupción volcánica es teniendo con anterioridad un plan integrado de riesgo volcánico, el cual tiene como base fundamental la evaluación de la amenaza volcánica que constituye un volcán determinado. Esto permite preparar planes de educación a la comunidad sobre los volcanes con los cuales convive, los fenómenos volcánicos y las amenazas a que pueden estar expuestos en un futuro. La educación y concientización pública es un factor fundamental para la reducción eficaz del riesgo de desastres. Su desarrollo se logra promoviendo la divulgación de estos riesgos, por ejemplo, mediante la elaboración y la disseminación de información a través de mapas de fácil comprensión para que puedan conocer el estado de amenaza al que está sometido su territorio, ya que la verdadera prevención de desastres naturales pasa por un adecuado ordenamiento territorial y una eficiente comunicación del riesgo.

8. REFERENCIAS

ADGER, W. N. 2006. Vulnerability. *Journal Global Environmental Change*. Vol. **16** N°**3**: 268-281.

ÁLVAREZ, N. 2020. Evaluación del peligro de inundación por lahares en los volcanes Callaqui, Llaima, Lonquimay, Mocho-Choshuenco, Tolhuaca y Villarrica, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción. Departamento de Ciencias de la Tierra: 202 pp. Concepción.

AMIGO, A. & BERTIN, D. 2014. Peligros Volcánicos del Volcán Hudson, Región de Aysén del General Carlos Ibañez del Campo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental. N°**20**: 31 pp., 1 mapa en escala 1:75.000. Santiago.

AMIGO, A. & BERTIN, D. 2015. Peligros del Volcán Cerro Azul-Quizapu, Región del Maule. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental. N°**23**, 1 mapa escala 1:50.000. Santiago.

AMIGO, A.; LARA, L. & BERTIN, D. 2015. Peligros del Volcán Chaitén, Región de Los Lagos. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental. N° **24**, 1 mapa escala 1:50.000. Santiago.

ARIAS, D. 2020. Análisis de peligro volcánico por caída de tefra y proyectiles balísticos volcánicos en los volcanes Callaqui, Tolhuaca, Lonquimay, Llaima, Villarrica y Mocho-Choshuenco, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción. Departamento de Ciencias de la Tierra: 183 pp. Concepción.

ASTUDILLO MANOSALVA, D. F. 2018. Evolución de volátiles y elementos traza ligeros, a través de inclusiones vítreas, y su rol en la erupción de 2015 del volcán Calbuco, X Región, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y matemáticas: 106 pp. Santiago.

AUKER, M. R.; SPARKS, R. S. J.; SIEBERT, L.; CROSWELLER, H. S. & EWERT, J. 2013. A statistical analysis of the global historical volcanic fatalities record. *Journal of Applied Volcanology*. N°**2**: 1-24.

BCN. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (<https://www.bcn.cl>).

- BENAVENTE, O. 2010. Actividad hidrotermal asociada a los complejos volcánicos Planchón-Peteroa y Descabezado Grande-Quizapu-Cerro Azul, 36 y 37 S, Zona Volcánica Sur, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y matemáticas: 190 pp. Santiago
- BERTIN, L. 2014. Granulometría, morfología, geoquímica y geocronología de los productos holocenos del volcán Hudson, Región de Aysén, Chile. Memoria de Título, Universidad de Concepción: 110 pp. Concepción.
- BERTIN, D. & AMIGO, A. 2014. Peligros del volcán San Pedro, Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental. Vol. **1**, 1 mapa escala 1:50.000. Santiago.
- BERTIN, D. & AMIGO, A. 2015. Geología y peligros del volcán San Pedro, II Región. En Actas XIV Congreso Geológico Chileno. Vol. **3**: 128-131. La Serena.
- BERTIN, D. & AMIGO, A. 2019. Geología del volcán San Pedro, Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica. N°**201**: 71 pp, 1 mapa escala 1:50.000. Santiago.
- BERTIN, D. & SILVA, C. 2015. Geología y peligros del volcán Tupungatito, Región Metropolitana de Santiago. En XVI Congreso Geológico Chileno: 3 pp.
- BERTIN, D.; SILVA, C.; KRAUS, S. & OROZCO, G. 2013. Geología del volcán Tupungatito, Región Metropolitana de Santiago, Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica. N°**369**, 1 mapa escala 1:25.000. Santiago.
- BLODGETT, R. H. & KELLER, E. A. 2007. Volcanes. En Riesgos Naturales. *Prentice Hall*: 72-104. Madrid.
- BLONG, R. J. 1984. Volcanic Hazards: A Sourcebook on the Effects of Eruptions. Elsevier: 423 pp. Sydney.
- BLONG, R. J. 1996. Volcanic hazards risk assessment. Monitoring and mitigation of volcano hazards: 675-698.
- BÖRGEL, R. 1983. Geomorfología. Geografía de Chile. Tomo II. Instituto Geográfico Militar, Chile: 107 pp. Santiago.

- BRAHM SCOTT, R. 2017. Trachytic lavas of the Quetrupillán Volcanic Complex, Chile (39° 30'S): Examples of rejuvenation of a crystalline mush reservoir. Tesis de Magíster en Ciencias, Mención Geología. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y matemáticas: 132 pp. Santiago.
- BRÜGGEN, M.J. 1950. Fundamentos de la Geología de Chile: 374 pp.
- CÁRDENAS, E. G.; LAHOZ, E. E.; RAMÍREZ, R. B. & REY, R. U. G. 2018. Erupción del Calbuco en 2015 y su repercusión en la vegetación del entorno. Lahares en río Blanco y Correntoso (Región de los Lagos, Chile). En bosque mediterráneo y humedales: paisaje, evolución y conservación: aportaciones desde la biogeografía: 646-655.
- CARDONA, O.D. 1992. Evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo "Elementos para el ordenamiento y la planeación del desarrollo". Simposio Latinoamericano de riesgo geológico urbano: 51-73.
- CARDONA, O. D. 1993. Evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo. En Los desastres no son naturales. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina: 51-74.
- CAREY, S.; SIGURDSSON, H.; MANDEVILLE, C. & BRONTO, S. 1996. Pyroclastic flows and surges over water: an example from the 1883 Krakatau eruption. *Bulletin of Volcanology*. Vol. 7 N° 57: 493- 511.
- CARI, L. & MUÑOZ, J. 2006. Evaluación preliminar de riesgos de lahares del Volcán Osorno en Las Cascadas, X Región, Chile. En XI Congreso Geológico Chileno: 7-11.
- CASHMAN, K. V.; STEPHEN, R. & SPARKS, J. 2013. How volcanoes work: A 25 year perspective. *Bulletin of the Geological Society of America*. N°125: 664-690.
- CEMBRANO, J. & LARA, L. 2009. The link between volcanism and tectonics in the southern volcanic zone of the Chilean Andes: a review. *Tectonophysics*. Vol. 1-2 N°471: 96-113.
- CEMBRANO, J.; HERVÉ, F. & LAVENU, A. 1996. The Liquiñe Ofqui fault zone: a long-lived intra-arc fault system in southern Chile. *Tectonophysics*. Vol. 1-3 N°259: 55-66.
- CHARDON, A.C. 2002. Un enfoque geográfico de la vulnerabilidad en zonas urbanas expuestas a amenazas naturales. El ejemplo andino de Manizales, Colombia. Centro de Publicaciones. Manizales. N° 174. Colombia.
- CLAVERO, J. 2007. Peligros del Complejo Volcánico Taapaca, Región de Arica y Parinacota. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental. Vol. 10, 1 mapa escala 1:50.000. Santiago.

CLAVERO, J. & SPARKS, R.S.J. 2005 Geología del Complejo Volcánico Taapaca, Región de Tarapacá. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica. N° **93**: 23 pp, 1 mapa escala 1:50.000. Santiago.

CLAVERO, J.E.; SPARKS, R.S.J.; PRINGLE, M.S.; POLANCO, E. & GARDEWEG, M. 2004. Evolution and volcanic hazards of Taapaca Volcanic Complex, Central Andes of Northern Chile. *Journal of the Geological Society*. N° **161**: 603–618.

CNE. Comisión Nacional de Energía de Chile. (<https://www.cne.cl>).

DRAKE, R. E. 1976. Chronology of Cenozoic igneous and tectonic events in the central Chilean Andes—Latitudes 35° 30' to 36° S. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. Vol. **3** N° **1**: 265-284.

DUSSAILLANT, A.; RUSSELL, A.; MEIER, A.; RIVERA, A.; MELLA, M.; GARRIDO, E.; HERNÁNDEZ, J.; NAPOLEONE, F. & GONZÁLEZ, C. 2016. Causes, Dynamics and Impacts of Lahar Mass Flows due to the April 2015 Eruption of Calbuco Volcano, Chile. *Geophysical Research Abstracts*. Vol. **18**.

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: U.S. Geological Survey Open-File Report: 62 pp.

EWERT, J.W. 2007, A system for ranking relative threats of U.S. volcanoes: *Natural Hazard Review*. Vol. **8** N°**3**: 112-124.

FARÍAS BARAHONA, D. 2016. Interacciones glaciovolcánicas: amenazas de lahares asociados a los glaciares del volcán Tupungatito. Tesis para optar al grado de Magíster en Geografía Mención Recursos Territoriales. Universidad de Chile. Facultad de Arquitectura y Urbanismo: 121 pp. Santiago.

FLORES, F. & JARA, G. 2018. Peligros del volcán Tupungatito, Región Metropolitana de Santiago. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental: 32-35, 1 mapa escala 1:50.000. Santiago.

GARCÍA, M. 2001. Evolution oligo-neógene de l'arc et de l'avant-arc de l'Altiplano (Andes Centrales, Coude d'Arica, 18–19°S). Tectonique, volcanisme, sedimentation, geomorphologie et bilan érosion–sédimentation. Université Joseph Fourier, Francia.

GARCÍA, M.; GARDEWEG, M.; CLAVERO, J. & HÉRAIL, G. 2004. Mapa Geológico de la Hoja Arica. Servicio Nacional de Geología y Minería, Chile. Escala 1:250.000. Santiago.

GEHL, P.; QUINET, C.; LE COZANNET, G.; KOUOKAM, E. & THIERRY, P. 2013. Potential and limitations of risk scenario tools in volcanic areas through an example at Mount Cameroon. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. Vol. **10** N°**13**: 2409-2424.

GLOBAL VOLCANISM PROGRAM. 2013. *Volcanoes of the World*, v. 4.11.2 (02 Sep 2022). Venzke, E (ed.). Smithsonian Institution. Downloaded 30 Oct 2022. <https://doi.org/10.5479/si.GVP.VOTW4-2013>.

GONZÁLEZ-FERRÁN, O. 1995. *Volcanes de Chile*. Instituto Geográfico Militar: 640 pp. Santiago.

GUTIÉRREZ, F.; GIONCADA, A.; FERRAN, O. G.; LAHSEN, A. & MAZZUOLI, R. 2005. The Hudson Volcano and surrounding monogenetic centres (Chilean Patagonia): an example of volcanism associated with ridge–trench collision environment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. Vol. **3** N°**145**: 207-233.

HIDALGO, N. (2023). Metodología de evaluación de amenaza en centros volcánicos y poblados aledaños aplicada en los volcanes Callaqui, Llaima, Lonquimay, Tolhuaca, Villarrica y Mocho-Choshuenco, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción. Departamento de Ciencias de la Tierra (Inédito): 205 pp. Concepción.

HILDRETH, W. & DRAKE, R. E. 1992. Volcán Quizapu, Chilean Andes. *Bulletin of Volcanology*. Vol. **2** N°**54**: 93-125.

HILDRETH, W. E. S. & GRUNDER, A. L. 1984. The Loma Seca Tuff and the Calabozos caldera: A major ash-flow and caldera complex in the southern Andes of central Chile. *Geological Society of America Bulletin*. Vol. **1** N°**95**: 45-54.

HILDRETH, W. & MOORBATH, S. 1988. Crustal contributions to arc magmatism in the Andes of Central Chile. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. Vol. **4** N°**98**: 455-489.

HUFSCHMIDT, G. 2011. Comparative analysis of several vulnerability concepts. *Nat Hazards*. N°**58**: 621-643.

IDE. Infraestructuras de Datos Geoespaciales. Ministerio de bienes nacionales de Chile. (<https://www.ide.cl>).

INE. Instituto Nacional de Estadística de Chile. (<https://www.ine.gob.cl>).

INE. Censo 2017. Chile.

INE (2018). Base cartográfica censal. Alcances y consideraciones para el usuario. Departamento de geografía. Instituto nacional de estadísticas.

INFORME AMBIENTAL. 2012. Plan regulador comunal de Romeral. Localidades de Romeral y Los Queñes. Región del Maule. Municipalidad Comuna de Romeral: 51 pp.

JANDA, R. J.; SCOTT, K. M. & NOLAN, K. M. 1981. Lahar movement, effects, and deposits. In P. W. Lipman and D. R. Mullineaux (eds.) The 1980 Eruptions of Mount St. Helens, Washington, US. Geological Survey Professional Paper. N°**1250**: 461–478. Washington.

JORQUERA, C. 2018. Análisis de peligro volcánico por flujos de lava y corrientes de densidad piroclástica en los estratovolcanes activos Callaqui, Llaima, Lonquimay, Tolhuaca, Villarrica y Mocho-Choshuenco, Chile. Memoria para optar al Título de Geóloga. Universidad de Concepción. Departamento de Ciencias de la Tierra: 187 pp. Concepción.

LARA, L.E. 2009. The 2008 eruption of the Chaitén Volcano, Chile: a preliminary report. *Andean Geology*. Vol. **1**. N°**36**: 125-129.

LARA, L. E. & CALDERÓN, R. 2015. Peligro y riesgo específico asociado al volcán Chaitén: perspectiva geológica de la vulnerabilidad en el entorno de un volcán activo. Vol. **3** N°**43**: 27-35. Punta Arenas.

LARA, L. E.; MORENO, R.; AMIGO, Á.; HOBLITT, R. P. & PIERSON, T. C. 2013. Late Holocene history of Chaitén Volcano: New evidence for a 17th century eruption. *Andean Geology*. Vol. **2** N°**40**:249-261.

LAVELL, A. 2007. Apuntes para un reflexión institucional en países de la Subregión Andina sobre el enfoque de la Gestión del Riesgo. PREDECAM: 41 pp. Lima.

LEMUS HERNÁNDEZ, M. G. 2010. Análisis termal del complejo volcánico Descabezado Grande y Planchon Peteroa mediante sensores remotos. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y matemáticas: 178 pp. Santiago.

LLINARES, A.; ORTIZ, R. & MARRERO, J. M. 2004. Riesgo Volcánico. Dirección general de protección civil y emergencias. Ministerio del interior: 103 pp. Madrid.

LOCKWOOD, J. P. & HAZLETT, R. W. 2013. Volcanoes: Global Perspectives, John Wiley & Sons: Chichester: 552 pp.

- LOUGHLIN, S.; BAXTER, P.; ASPINALL, W.; DARROUX, B.; HARFORD, C. & MILLER, A. 2002. Eyewitness accounts of the 25 June 1997 pyroclastic flows and surges at Soufrière Hills Volcano, Montserrat, and implications for disaster mitigation. *Geological Society*. N°21: 211-230. Londres.
- LOUGHLIN, S. C.; SPARKS, R. S. J.; SPARKS, S.; BROWN, S. K.; JENKINS, S. F. & VYE-BROWN, C. 2015. *Global volcanic hazards and risk*. Cambridge University Press: 393 pp. Cambridge.
- MACDONALD, G. A. 1972. *Volcanoes. A discussion of volcanoes, volcanic products, and volcanic phenomena*. Prentice-Hall: 510 pp. Nueva Jersey.
- MAJOR, J. J. & LARA, L. E. 2013. Overview of Chaitén Volcano, Chile, and its 2008-2009 eruption. *Andean Geology*. Vol. 2 N°40: 196-215.
- MAJOR, J. J.; PIERSON, T. C.; HOBLITT, R. P. & MORENO, H. 2013. Pyroclastic density currents associated with the 2008-2009 eruption of Chaitén Volcano (Chile): Forest disturbances, deposits, and dynamics. *Andean Geology*. Vol. 2. N°40: 324-358.
- MANVILLE, V.; NEUBERG, J.; JONES, R.; CALDER, E. & MUDD, S. 2016. A tale of three rivers: Volcano-sedimentary response to the 2015 Calbuco eruption, Chile. Abstract conference, 9th Cities on Volcanoes. Puerto Varas.
- MELLA, M.; MORENO, H. & VERGÉS, A. 2016. Calbuco and Osorno volcanoes. Features and impacts of the April 2015 eruption: community awareness and preparedness: 11 pp.
- MIRANDA JORDANA, F. 2016. *Volcanoestratigrafía del sector sureste del Complejo Volcánico Planchón-Peteroa y geoquímica de las emisiones gaseosas asociadas, provincia de Mendoza*. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires: 82 pp. Buenos Aires.
- MONSALVE, M. 2000. *Guía para la evaluación de la amenaza volcánica y elaboración de mapas de amenaza volcánica potencial en Colombia*: 71 pp.
- MONTECINOS, F. 1963. *Observaciones de geología en el Cuadrángulo de Campanani, Departamento de Arica, Provincia de Tarapacá*. Universidad de Chile. Santiago.
- MORENO ROA, H.; LÓPEZ-ESCOBAR, L. & CEMBRANO, J. 1994. The Villarrica-Quetrupillan-Lanin volcanic chain: a review and probable significance in the Southern Andes, Chile. *Congreso Geológico Chileno*. N°7: 339-341.
- MORENO, H. 1998. *Estudio preliminar de los peligros asociados a los volcanes Osorno y Calbuco*. En *Estudio Geológico-Económico de la X Región Norte*. Servicio Nacional de Geología y Minería. Santiago.

- MORENO, H. 1999a. Mapa de Peligros del Volcán Osorno, Región de Los Lagos. Servicio Nacional de Geología y Minería, Documentos de Trabajo. N°**11**, 1 mapa escala 1:75.000, Santiago.
- MORENO, H. 1999b. Mapa de Peligros del Volcán Calbuco, Región de Los Lagos. Servicio Nacional de Geología y Minería, Documentos de Trabajo. N°**12**, 1 mapa escala 1:75.000, Santiago.
- MORENO, H. 2017. Peligros del Volcán Quetrupillán, Regiones de La Araucanía y de Los Ríos. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental. N°**30**, 1 mapa escala 1:50.000, Santiago.
- MORENO, H. & LARA, L. 2008. Geología del Área Pucón-Curarrehue, Regiones de La Araucanía y de Los Ríos. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica: N°**115**: 36 pp, 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- MORENO, H.; LARA, L.E. & OROZCO, G. 2010. Geología del volcán Osorno, Región de Los Lagos. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica. N°**126**: 31 pp, 1 mapa escala 1:50.000, Santiago.
- MORENO, H.; THIELE, R. & VARELA, J. 1988. Estudio preliminar del riesgo geológico en la Alta Cordillera, Proyecto Alfalfal, Chilectra Generación S.A: 599 pp.
- MORENO, H.; VARELA, J.; LÓPEZ, L.; MUNIZAGA, F. & LAHSEN, A. 1985. Geología y riesgo volcánico del volcán Osorno y centros eruptivos menores. Universidad de Chile. Departamento de Geología y Geofísica para ENDESA: 212 pp. Santiago.
- MUÑOZ, J. & MORENO, H. 2002. Mitigación de riesgos volcánicos: volcanes Osorno y Calbuco. Servicio Nacional de Geología y Minería. Santiago.
- MUÑOZ, N. & CHARRIER, R. 1996. Uplift of the western border of the Altiplano on a west-vergent thrust system, Northern Chile. *Journal of South American Earth Sciences*. Vol. **3-4** N°**9**: 171–181.
- MUÑOZ, N. & SEPÚLVEDA, P. 1992. Estructuras compresivas con vergencia al Oeste en el borde oriental de la Depresión Central, Norte de Chile (19°15'lat. S). *Revista Geológica de Chile*. Vol. **2** N°**19**: 241–247.
- MUÑOZ RAMÍREZ, R. A. 2019. Control estructural del basamento sobre el volcanismo cuaternario del complejo volcánico Chaitén-Michinmahuida. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Concepción. Facultad de Ciencias Químicas: 106 pp. Concepción.
- NARANJO, J. A. 1991. Nueva erupción del volcán Hudson. *Andean Geology*, Vol. **2** N°**18**: 183-184.

NARANJO, J.A.; HALLER, M.J.; OSTERA, H.A.; PESCE, A.H. & SRUOGA, P. 1999. Geología y peligros del Complejo Planchón-Peteroa. Andes del Sur (35°15'S), Región del Maule, Chile-Provincia de Mendoza, Argentina. Servicio Nacional de Geología y Minería. N°52: 55 pp, 2 mapas escala 1:100.000. Santiago.

NARANJO, J. A. & STERN, C. R. 1998. Holocene explosive activity of Hudson Volcano, southern Andes. *Bulletin of Volcanology*. Vol. 4 N°59: 291-306.

NEWHALL, C.G. & SELF, S. 1982. The volcanic explosivity index (VEI): An estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *Journal of Geophysical Research*. N°87: 1231-1238.

ORIHASHI, Y.; NARANJO, J.A.; MOTOKI, A.; SUMINO, H.; HIRATA, D.; ANMA, R. & NAGAO, K. 2004. The Quaternary volcanic activity of Hudson and Lautaro volcanoes, Chilean Patagonia: new age constraints from K-Ar ages. *Revista Geológica de Chile*. Vol. 2 N°31: 207-224.

PACCI, D.; HERVÉ, F.; MUNIZAGA, F.; KAWASHITA, K. & CORDANI, U. 1980. Acerca de la edad Rb/Sr precámbrica de rocas de la Formación Esquistos de Belén. Departamento de Parinacota, Chile. *Revista Geológica de Chile*. N°11: 23-29.

PALLISTER, J. S.; DIEFENBACH, A. K.; BURTON, W. C.; MUÑOZ, J.; GRISWOLD, J. P.; LARA, L. E. & VALENZUELA, C. E. 2013. The Chaitén rhyolite lava dome: Eruption sequence, lava dome volumes, rapid effusion rates and source of the rhyolite magma. *Andean Geology*. Vol. 2 N°40: 277-294.

PANKHURST, R.J.; HERVÉ, F. & RAPELA, C.R. 1994. Sm-Nd evidence for the Grenvillian provenance of the metasedimentary basement of southern Chile and west Antarctica. Acta VII Congreso Geológico Chileno: 1414-1418. Concepción.

PANKHURST, R.J.; HERVÉ, F.; ROJAS, L. & CEMBRANO, J. 1992. Magmatism and tectonics in continental Chile, Chile 42-42°30'S. *Tectonophysics*. N°205: 283-294.

PANKHURST, R.K.; WEAVER, S.D.; HERVÉ, F. & LARRONDO, P. 1999. Mesozoic-Cenozoic evolution of the North Patagonian Batholith in Aysen, southern Chile. *Journal of the Geological Society*. N°156: 673-694. Londres.

PAVEZ, A. 1997. Geología e historia evolutiva del Complejo Volcánico Quetrupillán, Andes del Sur, 39, 5 S. En Congreso Geológico Chileno. N°8: 1443-1447.

- PAVEZ, A. & MORENO, H. 1994. Contribución al conocimiento geológico del Complejo Volcánico Quetrupillán, Andes del Sur, 39,5° S. En 7º Congreso Geológico Chileno. N°2: 1141-1145. Concepción.
- PERALES MOYA, C. V. 2020. Condiciones desencadenantes de la erupción traquidacítica H2 (3, 9 KA CAL AP) del Volcán Hudson, Región de Aysén, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo. Concepción. Universidad de Concepción. Facultad de Ciencias Químicas: 190 pp. Concepción.
- PEREZ-TORRADO, F.J. & RODRIGUEZ-GONZALEZ, A. 2015. ¿Cómo se miden las erupciones? El índice de explosividad volcánica. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra. Vol. 1 N°23: 24-32.
- 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 pp.
- PETIT-BREUILH, M.E. & MORENO, H. 1997. La erupción de 1893-1895 del volcán Calbuco (41.3°S) y sus efectos ambientales. En Congreso Geológico Chile. N°8, Actas 1: 780-784. Antofagasta.
- PIÑA-GAUTHIER, M. & VEGA, M. 2010. Caracterización geológica y geofísica del basamento del Complejo Volcánico Chaitén-Michinmahuida. Asesorías Geológicas (TEKTVM): 15 pp. Santiago.
- POLANCO, E.; CLAVERO, J.; GIMENO, D. & FERNANDEZ-TURIEL, J. L. 2008. Geoquímica de los últimos 450 ka del complejo volcánico Taapacá (18° 06'S), Andes Centrales, Chile: 4 pp.
- PYLE, D. 2015. Sizes of volcanic eruptions. In the *encyclopedia of volcanoes*. Academic Press: 257-264.
- RAMOS, V.A.; GODOY, E.; LO FORTE, G. & AGUIRRE-URETA, M.B. 1991. La franja plegada y corrida del norte del río Colorado, Región Metropolitana, Chile Central. En Congreso Geológico Chileno. N°6, Actas 1: 323-327. Viña del Mar.
- SALAS, R.; KAST, R.; MONTECINOS, F. & SALAS, I. 1966. Geología y recursos minerales del Departamento de Arica, Provincia de Tarapacá. Instituto de Investigaciones Geológicas. N°21: 1-130.
- SCHMIDT, A.; OSTRO, B.; CARSLAW, K. S.; WILSON, M.; THORDARSON, T.; MANN, G. W. & SIMMONS, A. J. 2011. Excess mortality in Europe following a future Laki-style Icelandic eruption. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. N°108: 15710-15715.

- SCOTT, W. E. 1989. Volcanic and related hazards. In R. I. Tilling (ed.) A Short Course in Geology, Volcanic Hazards. American Geophysical Union. Vol. 1: 9–23. Washington.
- SEGURA, A.; CASTRUCCIO, A.; CLAVERO, J.; LE PENNEC, J. L.; ROCHE, O.; SAMANIEGO, P.; DROGUETT, B. & ROMERO, J. 2015. Fallout deposits of the 22-23 April 2015 eruption of Calbuco volcano, Southern Andes. Holocene. N°2: 22-23.
- SELLÉS, D. & MORENO, H. 2011. Geología del volcán Calbuco, Región de Los Lagos. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica. N°130: 38 pp, 1 mapa escala 1:50.000. Santiago.
- SERNAGEOMIN-BRGM. 1995. Carta Metalogénica de la X Región Sur, Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería y Minería. Vol. 1, tomo 1: 193 pp. Santiago.
- SERNAGEOMIN. 2018. Chile: territorio volcánico. Servicio Nacional de Geología y Minería: 139 pp. Santiago.
- SERNAGEOMIN. 2019. Ranking de riesgo específico de volcanes activos de Chile 2019: 1 pp. Santiago.
- SEYDRIED, E.; WÖRNER, G.; UHLIG, D.; KHOLER I. & CALVO C. 1998. Introducción a la geología y geomorfología de los Andes en el norte de Chile. Vol. 1 N°30: 7-39.
- SIEBERT, L. 1984. Large volcanic debris avalanches: characteristics and source areas, deposits, and associated eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. N°22: 163–197.
- SILVA, C. 2011. Evaluación objetiva de la amenaza volcánica en el territorio nacional. Memoria para optar al título de Geógrafo. Universidad de Chile: 73 pp. Santiago.
- SIMKIN, T.; TILLING, R.I.; VOGT, P.R.; KIRBY, S.H.; KIMBERLY, P. & STEWART, D.B. 2006. This dynamic planet: world map of volcanoes, earthquakes, impact craters and plate tectonics. Ed. U.S. Geological Survey, Series map I-2800, escala 1:30.000.000.
- SIMMONS, I. C.; MCGARVIE, D.; CARRILLO, J. A. C.; CALDER, E. & PAVEZ, A. 2020. Holocene volcanism at the Quetrupillán Volcanic complex (39° 30'S, 71° 43'W), southern Chile. Vol. 1 N°3: 1-23.
- SPENCE, R.; KELMAN, I.; BAXTER, P.; ZUCCARO, G. & PETRAZZUOLI, S. 2005. Residential building and occupant vulnerability to tephra fall. *Natural Hazards and Earth System Science*. N°5: 477- 494.

- STERN, C. R. 2004. Active Andean volcanism: its geologic and tectonic setting. *Revista geológica de Chile*. Vol. **2** N°**31**: 161-206.
- STERN, C.R.; MORENO, H.; LOPEZ-ESCOBAR, L.; CLAVERO, J.E.; LARA, L.E.; NARANJO, J.A.; PARADA, M.A. & SKEWES, M.A. 2007. Chilean volcanoes. In: Moreno, T., Gibbons, W. (Eds.), *The Geology of Chile. The Geological Society*: 147–179. Londres.
- SWORD-DANIELS, V. 2011. Living with volcanic risk: The consequences of, and response to, ongoing volcanic ashfall from a social infrastructure systems perspective on Montserrat. *Journal of Psychology*. N°**40**: 131-138. Nueva Zelanda.
- TILLING, R.I. 1993. Introducción y marco general. En: Apuntes para un curso breve sobre los peligros volcánicos (Ed. R.I. Tilling): 1-8.
- TILLING, R.I. 2005. Volcano hazards. *Volcanoes and the Environment* (Martí, J. & Ernst, G.). Cambridge University Press: 471 pp. Nueva York.
- TILLING, R. I. 2009. Volcanism and associated hazards: the Andean perspective. *Advances in Geosciences*. N°**22**: 125-137.
- TORMEY, D. R. & FREY, F. A. 1995. Geochemistry of the Active Azufre-Planchon-Peteroa Volcanic Complex, Chile (35°15'S): Evidence for Multiple Sources and Processes in a Cordilleran Arc Magmatic System. *Journal of Petrology*. Vol. **2** N°**36**: 265-298.
- UNDRO. 1979. Natural Disasters and Vulnerability Analysis in Report of Expert Group Meeting.
- UNISDR. 2009. Terminology on Disaster Risk Reduction. UN Publications, Ginebra, Suiza.
- VALENZUELA, C. 2011. Tasa de crecimiento del complejo de domos del volcán Chaitén, periodo Mayo 2008-Diciembre 2009. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y matemáticas: 55 pp. Santiago.
- WATT, S.; PYLE, D.; MATHER, T.; MARTI, R. & MATTHEWS, N. 2009. Fallout and distribution of volcanic ash over Argentina following the May 2008 explosive eruption of Chaitén, Chile. *Journal of Geophysical Research*. N°**114**: 11 pp.
- WILSON, T.; COLE, J.; CRONIN, S.; STEWART, C. & JOHNSTON, D. 2011. Impacts on agriculture following the 1991 eruption of Vulcan Hudson, Patagonia: Lessons for recovery. *Natural Hazards*. Vol. **2** N°**57**: 185–212.

WILSON, T. M.; STEWART, C.; SWORD-DANIELS, V.; LEONARD, G. S.; JOHNSTON, D. M.; COLE, J. W.; WARDMAN, J.; WILSON, G. & BARNARD, S. T. 2012. Volcanic ash impacts on critical infrastructure. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. N°**45**: 5-23.

WILSON, G.; WILSON, T. M.; DELIGNE, N. I. & COLE, J. W. 2014. Volcanic hazard impacts to critical infrastructure: A review. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. N°**286**: 148-182.

WÖRNER, G.; HAMMERSCHMIDT, K.; HENJES-KUNST, F.; LZAUN, J. & WILKE, H. 2000 Geochronology ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, K–Ar and He-exposure ages) of Cenozoic magmatic rocks from northern Chile (18–228S): implications for magmatism and tectonic evolution of the central Andes. *Revista Geológica de Chile*. Vol. **2** N°**27**: 205–240.

YAMIN, L.; GHESQUIERE, F.; CARDONA, O. D. & ORDAZ, M. G. 2013. Modelación probabilística para la gestión del riesgo de desastre. El caso de Bogotá, Colombia. Banco Mundial, Universidad de los Andes: 184 pp. Bogotá.



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ciencias Químicas
Departamento Ciencias de la Tierra



ANEXOS

Memoria para optar al Título de Geóloga

Paula Soledad Peñaloza Navarro

Profesor Patrocinante: Dr. José Luis Palma Lizama

Profesores Comisión: Dra. Fernanda Álvarez

Dr. Jorge Quezada

Concepción, 2023

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo		Página
1.	Mapas de exposición de los sistemas volcánicos de estudio y de los poblados afectados por sus peligros volcánicos.....	151
2.	Amenaza absoluta y normalizada de sistemas volcánicos y poblados por nivel de peligro	171
3.	Detalle de la evaluación de la población en sistemas volcánicos por nivel de peligro	173
4.	Detalle de la evaluación de infraestructuras en sistemas volcánicos por nivel de peligro.....	174
5.	Detalle de la evaluación de la población en poblados por nivel de peligro.	176
6.	Detalle de la evaluación de las infraestructura en poblados por nivel de peligro.....	177
7.	Detalle de la evaluación de infraestructuras críticas en sistemas volcánicos y poblados.....	180
8.	Detalle de las rutas amenazadas por los distintos niveles de peligro volcánico de los centros eruptivos evaluados.....	181
9.	Registro de erupciones de los sistemas volcánicos de estudio.....	187

ANEXO 1. MAPAS DE EXPOSICIÓN DE LOS SISTEMAS VOLCÁNICOS DE ESTUDIO Y DE LOS POBLADOS AFECTADOS POR SUS PELIGROS VOLCÁNICOS.

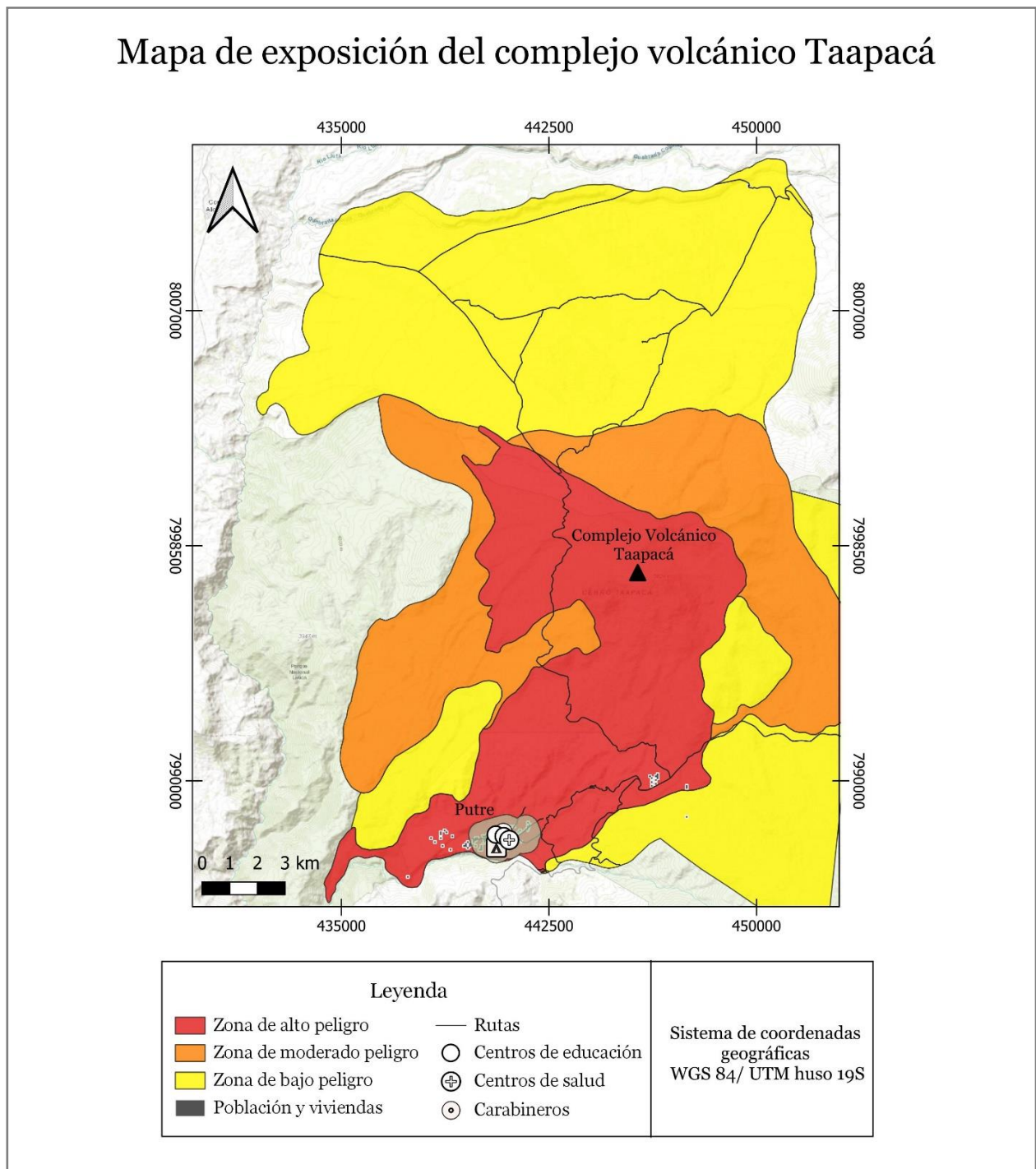
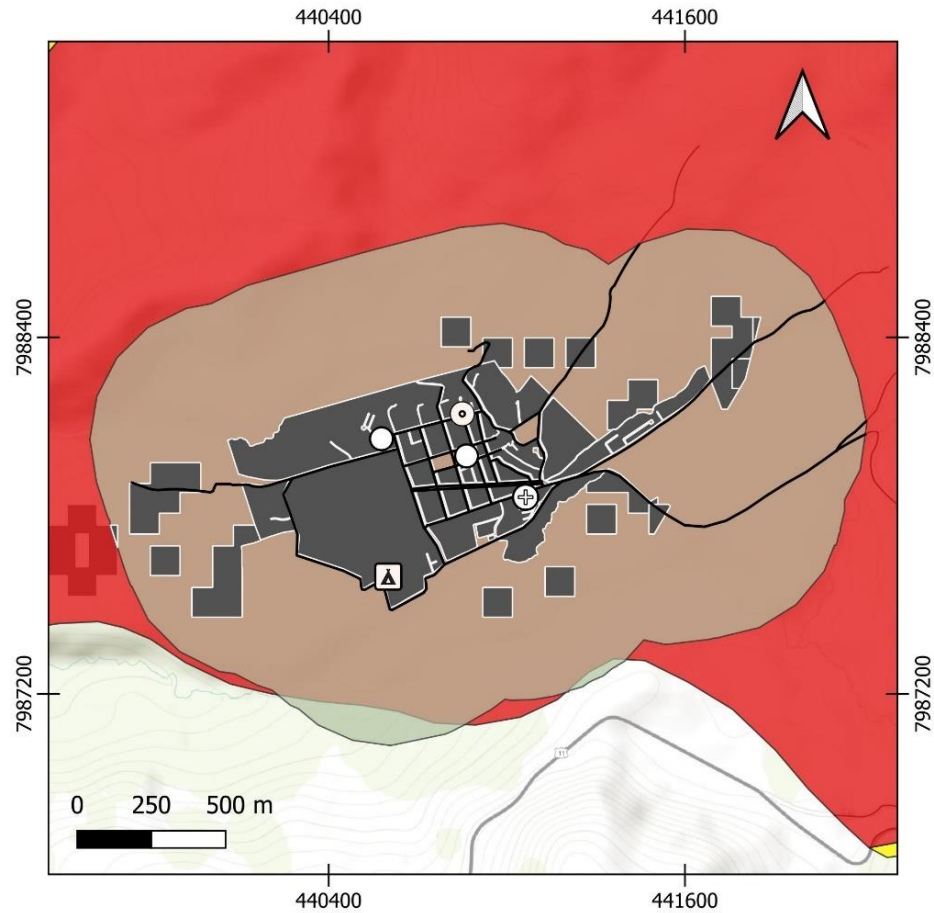


Figura 1. Mapa de exposición del complejo volcánico Taapacá. Elaboración propia.

Mapa de exposición de Putre



Leyenda		Sistema de coordenadas geográficas WGS 84/ UTM huso 19S
Zona de alto peligro	Centros de educación	
Buffer Putre	Centros de salud	
Población y viviendas	Carabineros	
Rutas	Municipios	

Figura 2. Mapa de exposición del poblado de Putre. Elaboración propia.

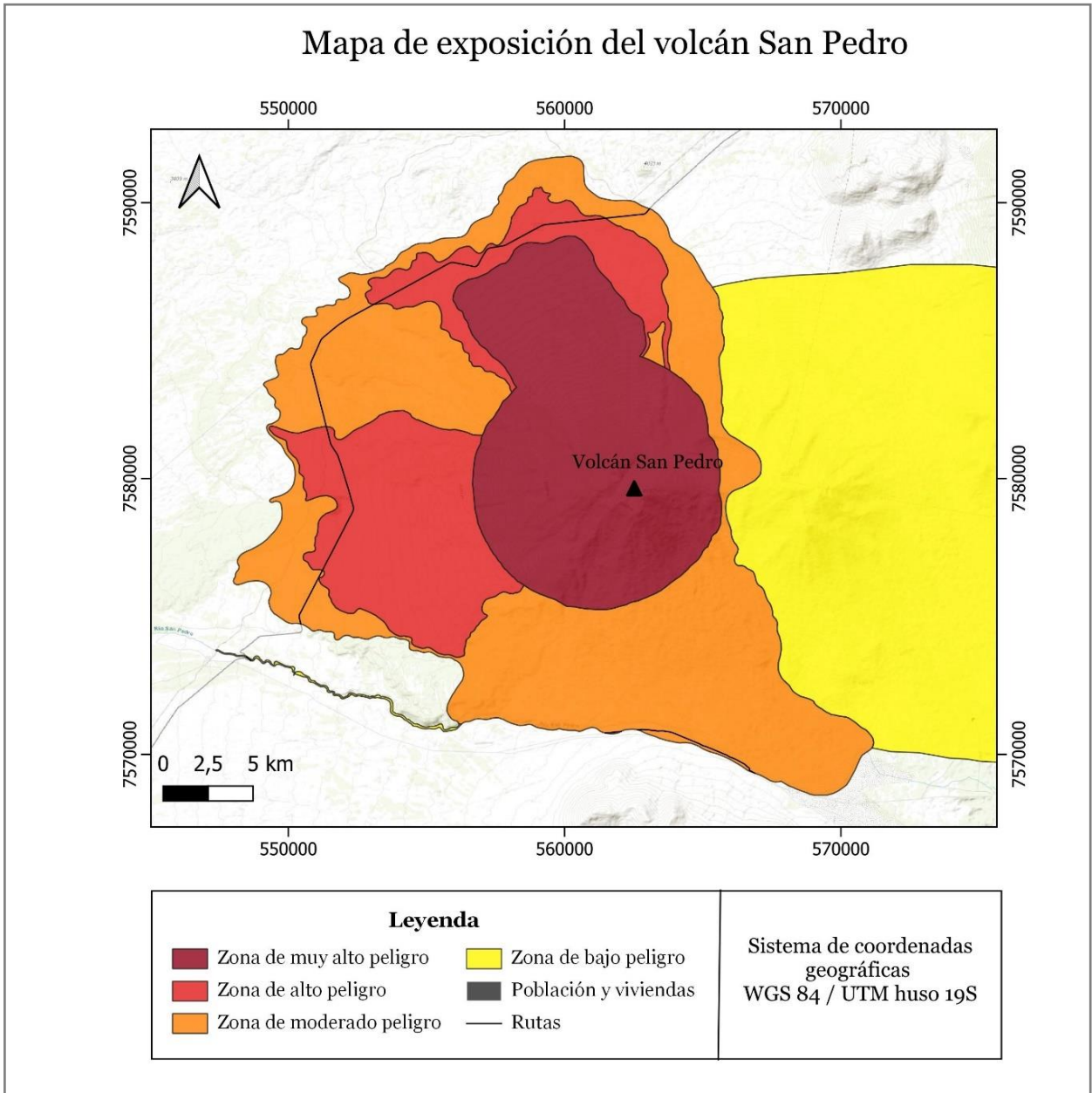


Figura 3. Mapa de exposición del volcán San Pedro. Elaboración propia.

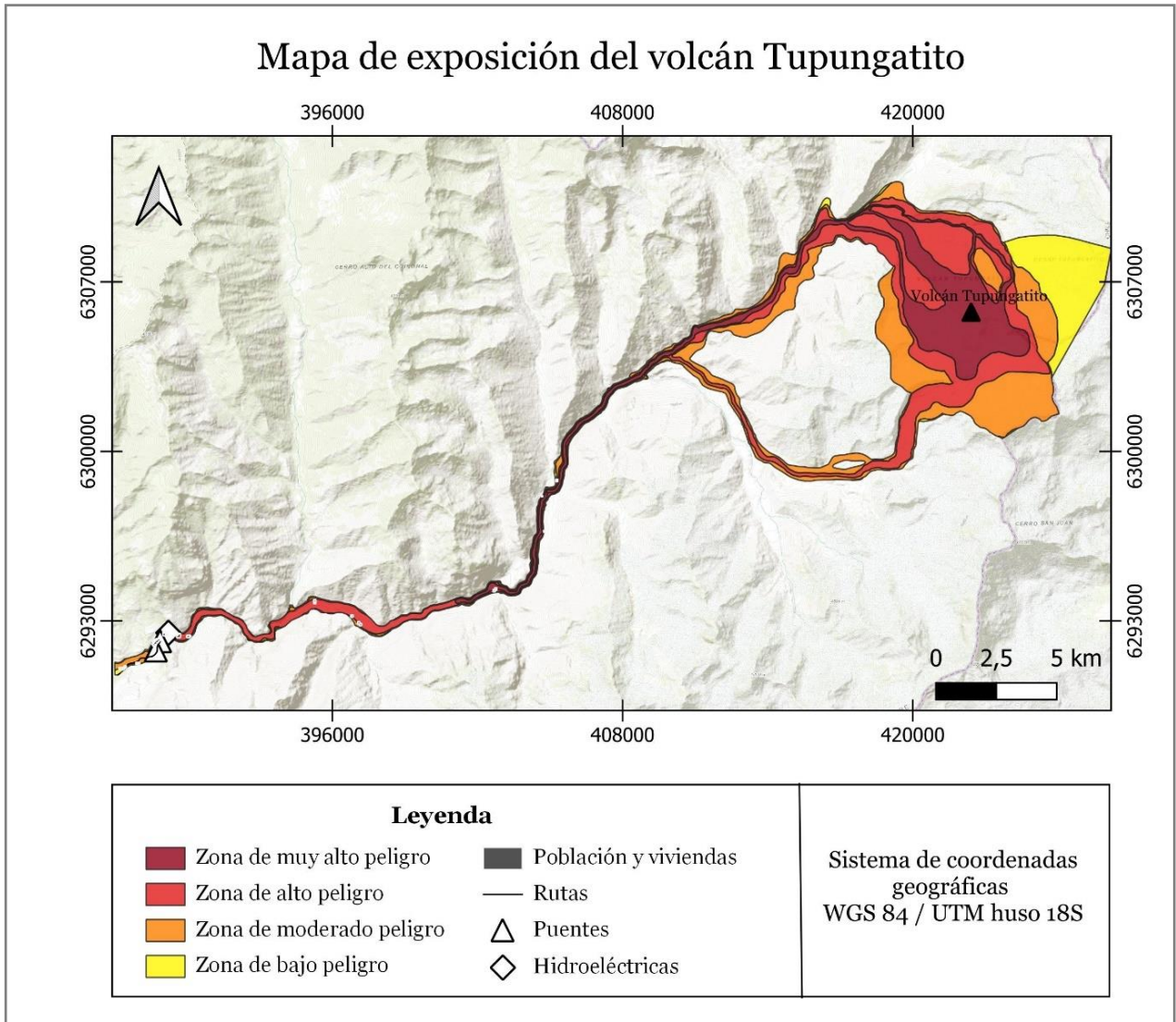


Figura 4. Mapa de exposición del volcán Tupungatito. Elaboración propia.

Mapa de exposición del complejo volcánico Planchón-Peteroa

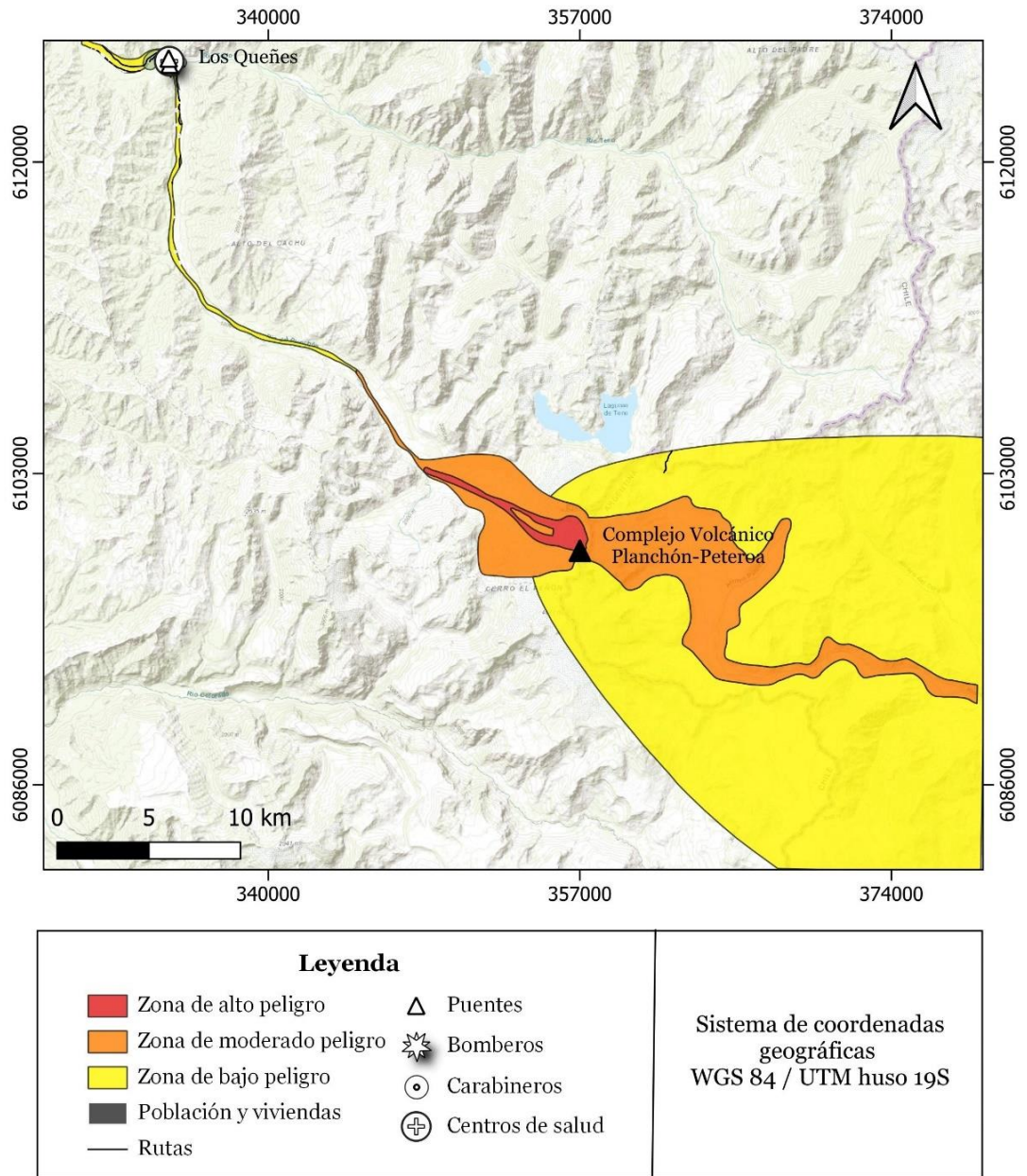


Figura 5. Mapa de exposición del complejo volcánico Planchón-Peteroa. Elaboración propia.

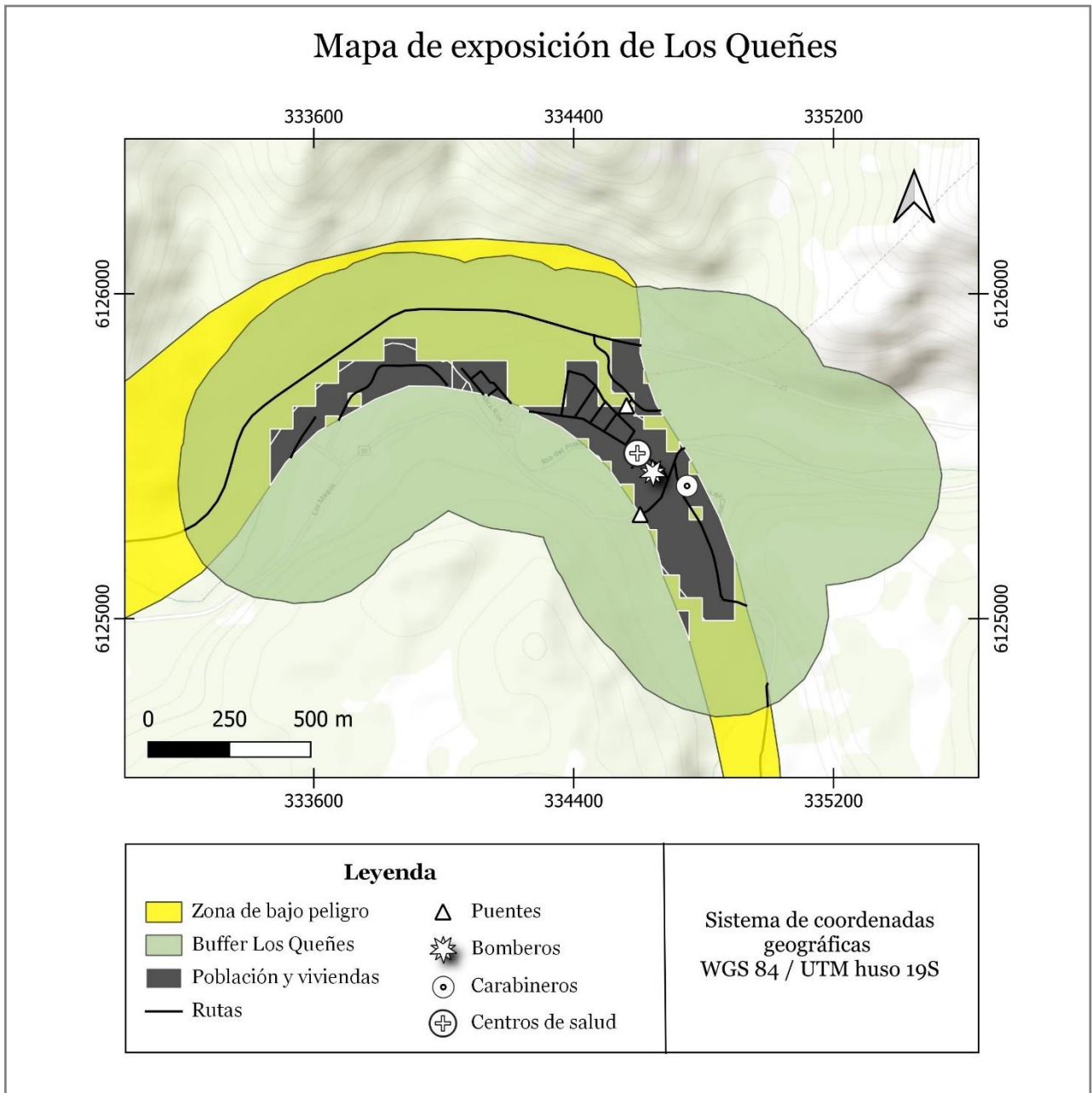
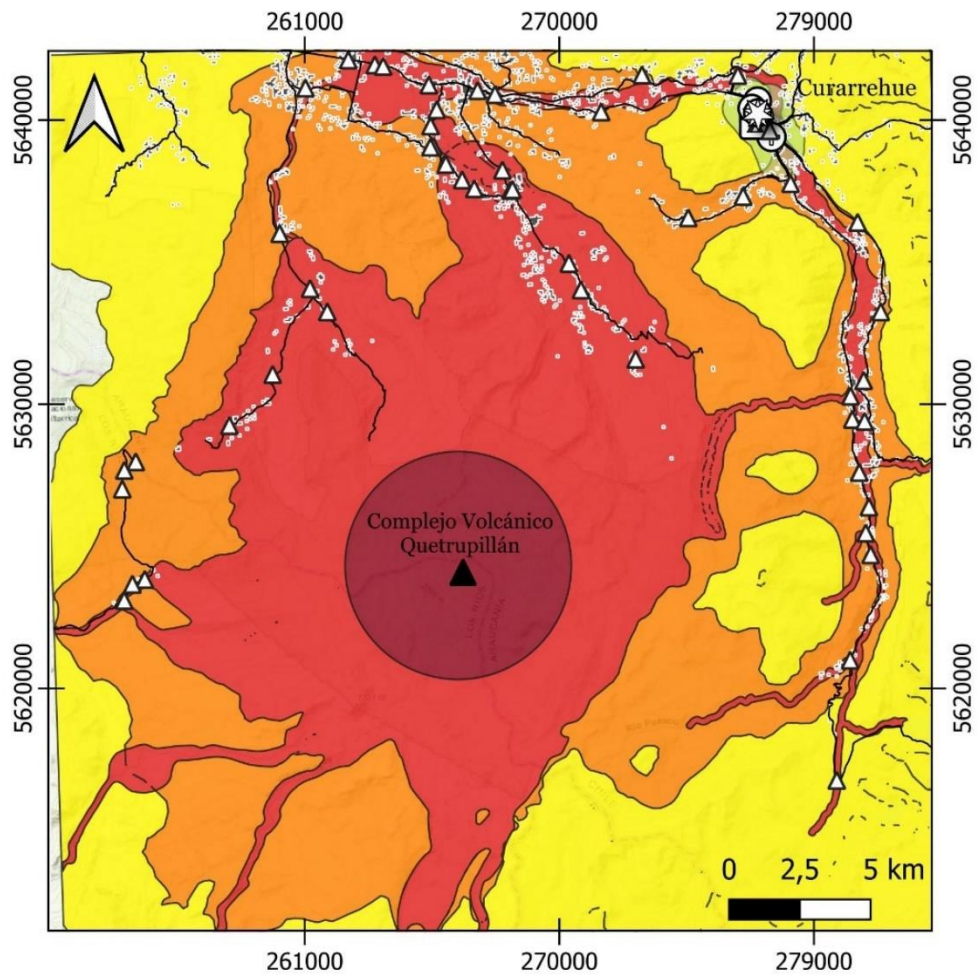


Figura 6. Mapa de exposición del poblado Los Queñes. Elaboración propia.

Mapa de exposición del complejo volcánico Quetrupillán



Leyenda		Sistema de coordenadas geográficas WGS 84/ UTM huso 19S
<ul style="list-style-type: none"> Zona de muy alto peligro Zona de alto peligro Zona de moderado peligro Zona de bajo peligro Población y viviendas Rutas 	<ul style="list-style-type: none"> Puentes Centros de educación + Centros de salud * Bomberos o Carabineros ▲ Municipios 	

Figura 7. Mapa de exposición del complejo volcánico Quetrupillán. Elaboración propia.

Mapa de exposición de Curarrehue

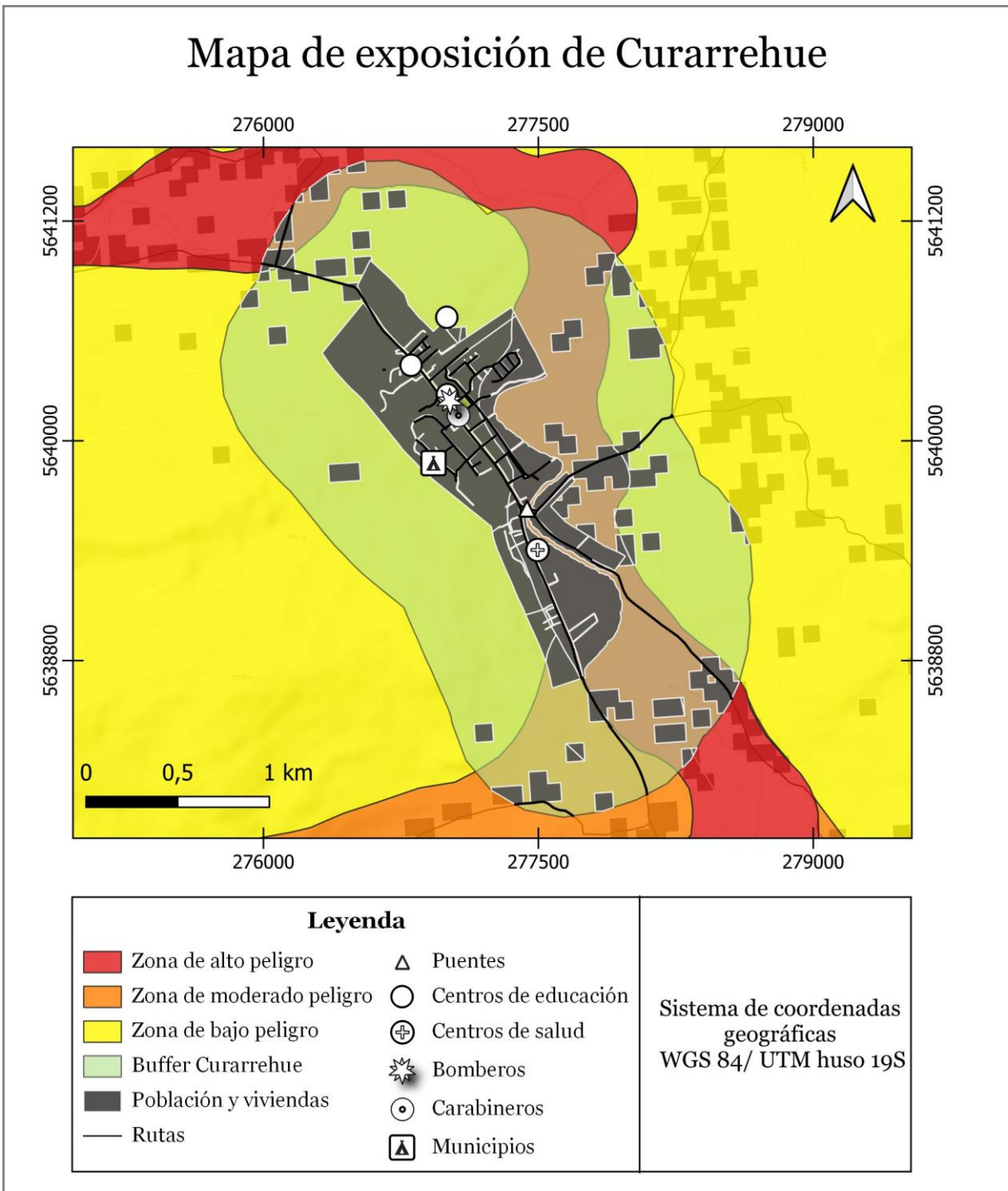


Figura 8. Mapa de exposición del poblado de Curarrehue. Elaboración propia.

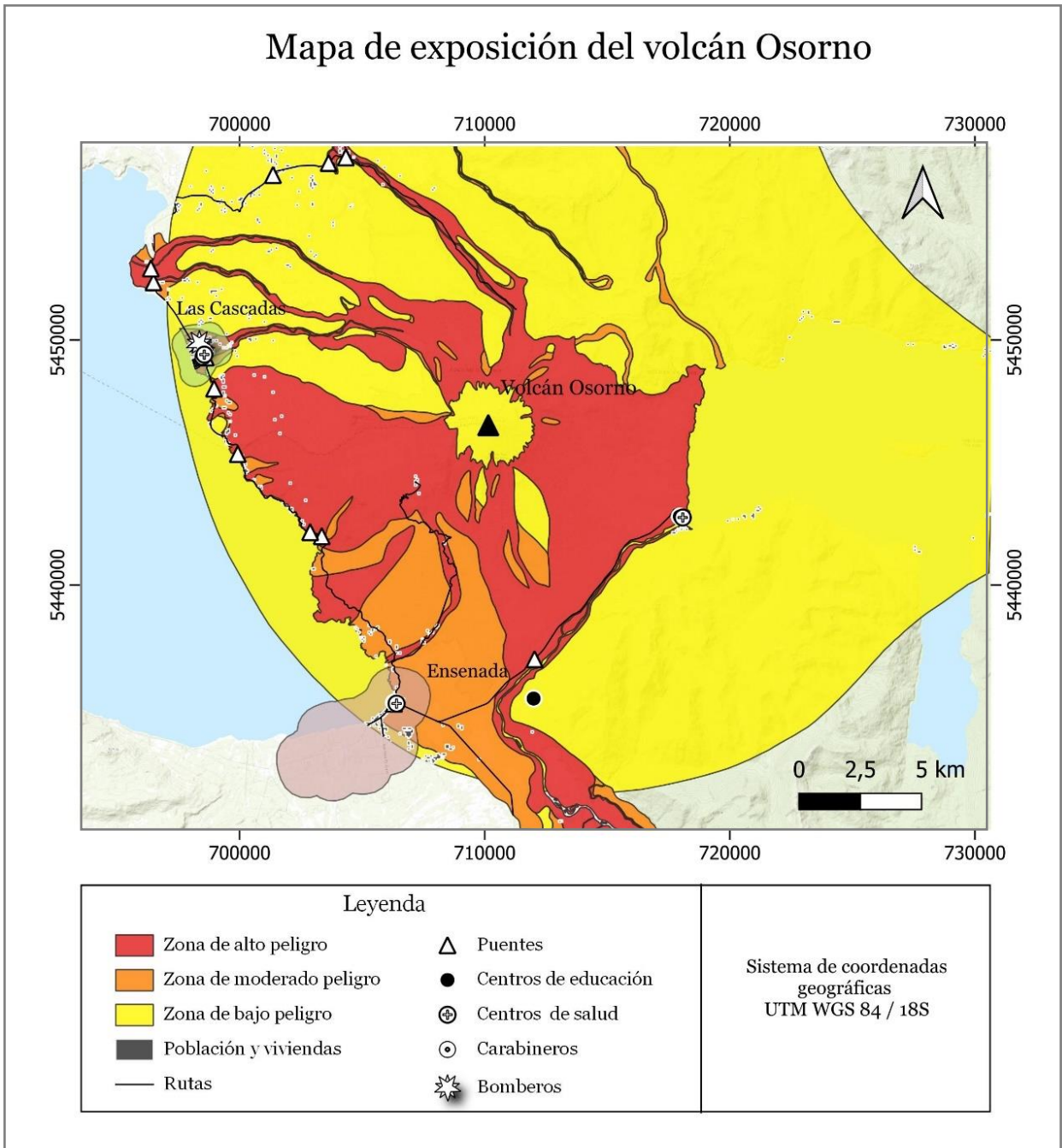


Figura 9. Mapa de exposición del volcán Osorno. Elaboración propia.

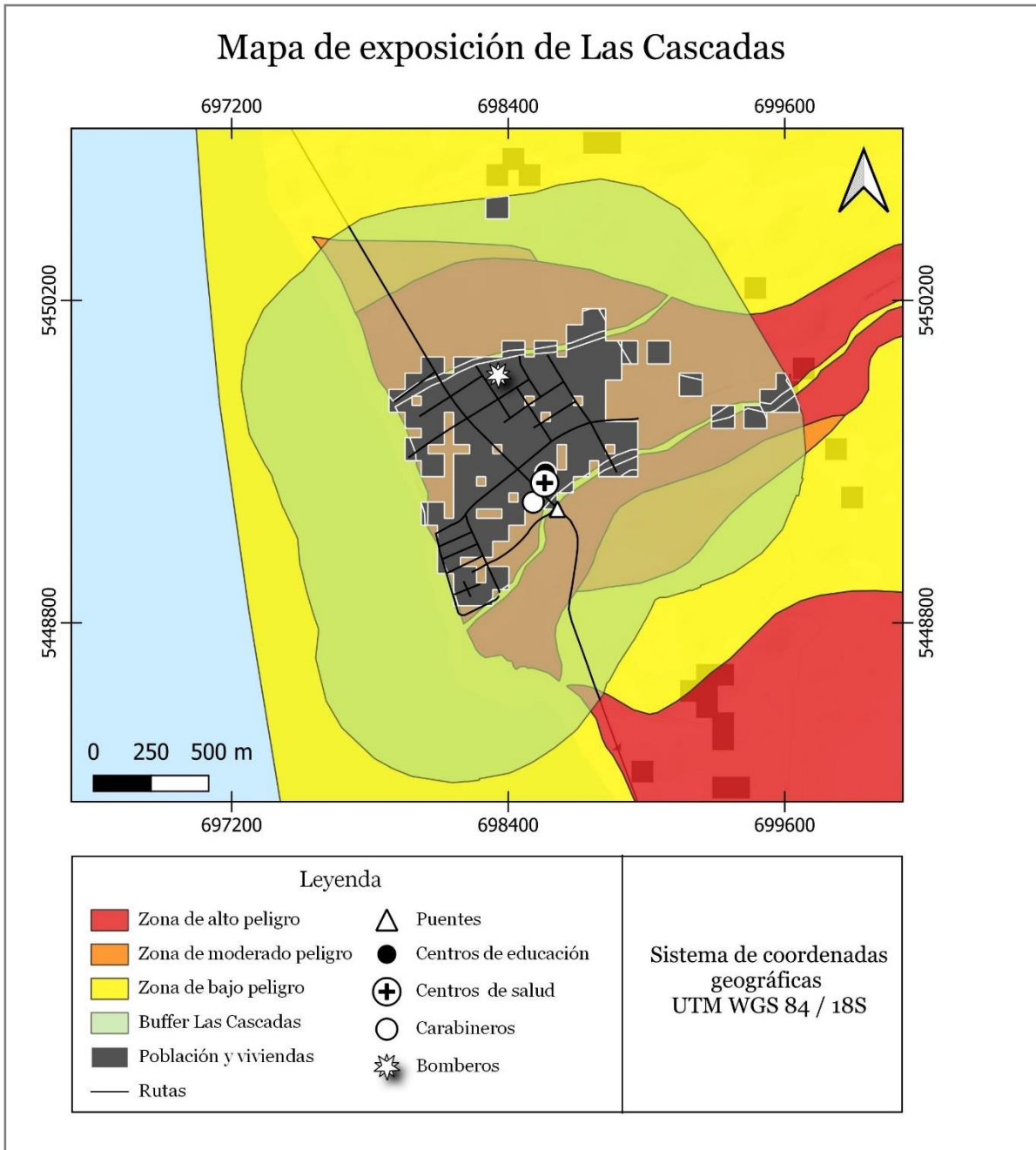


Figura 10. Mapa de exposición del poblado Las Cascadas. Elaboración propia.

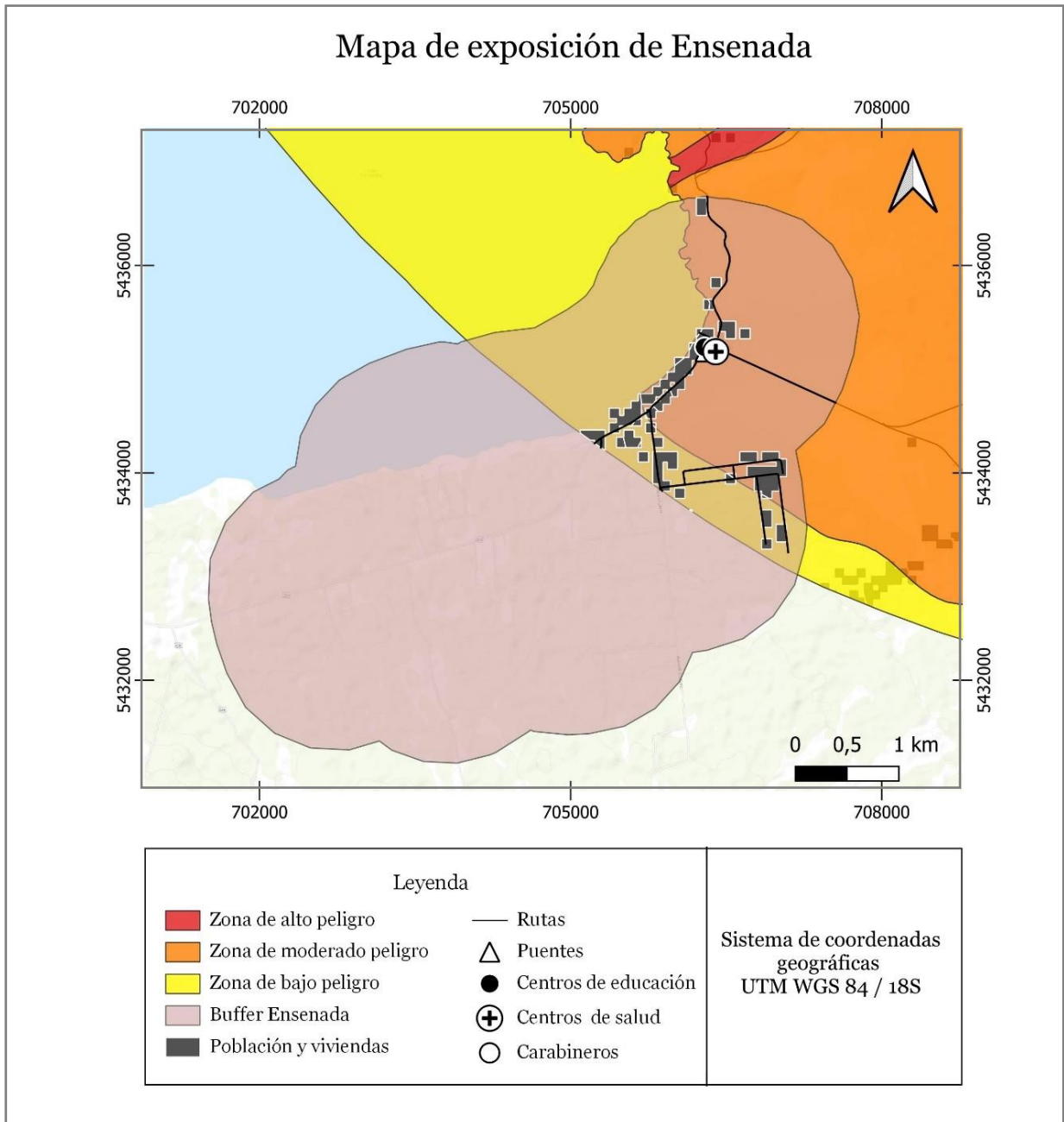


Figura 11. Mapa de exposición del poblado Ensenada a los peligros del volcán Osorno. Elaboración propia.

Mapa de exposición del volcán Calbuco

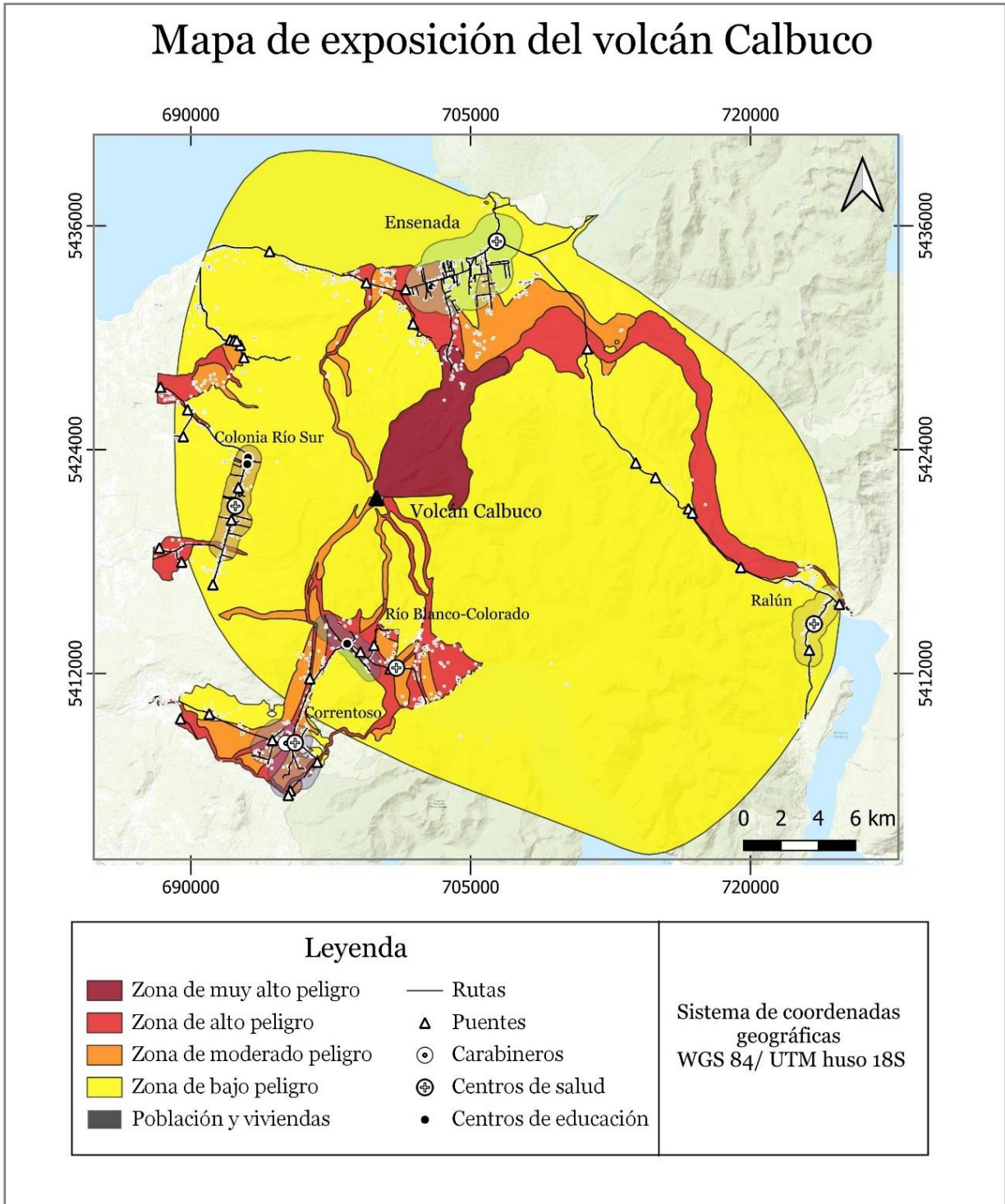


Figura 12. Mapa de exposición del volcán Calbuco. Elaboración propia.

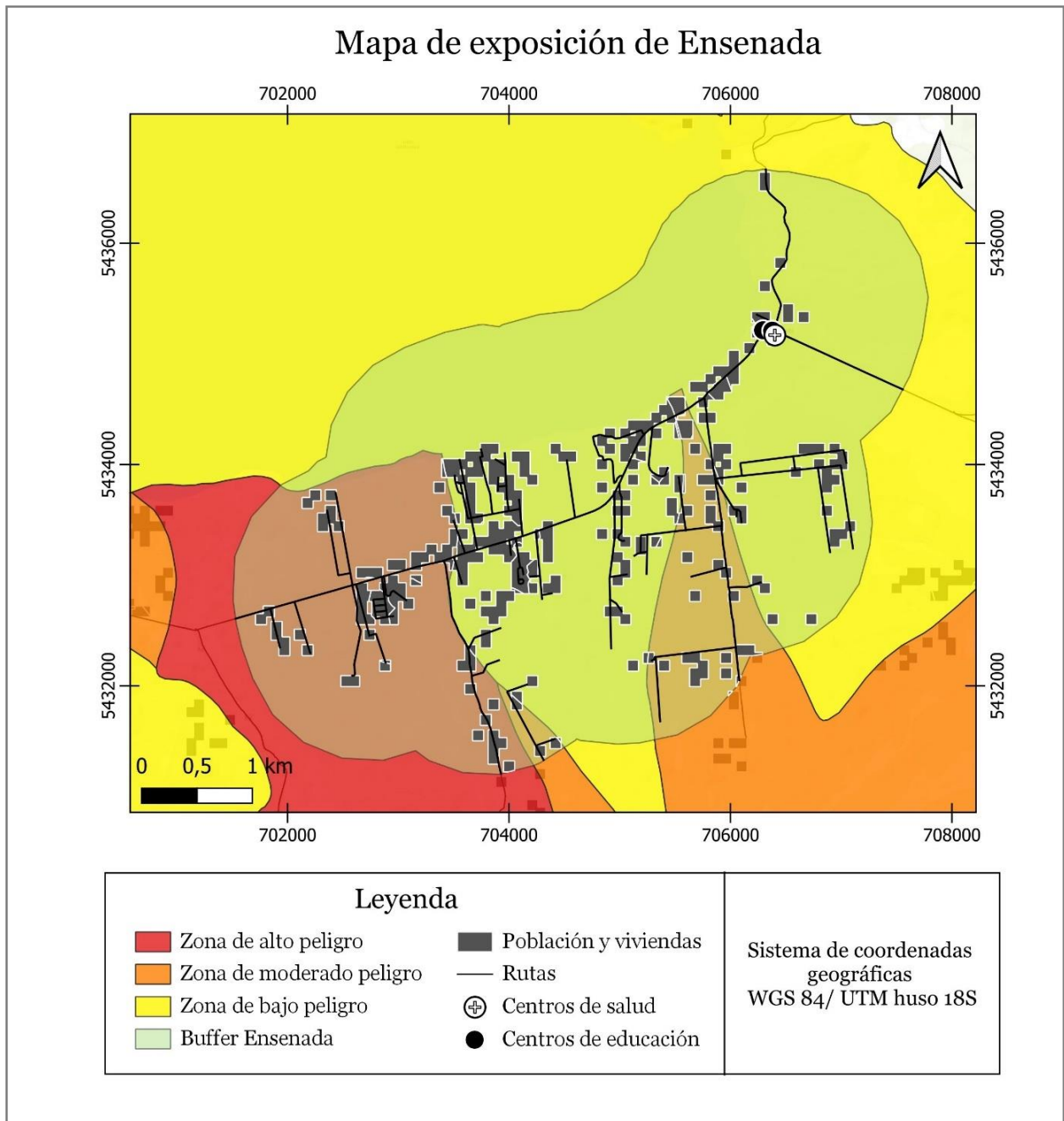


Figura 13. Mapa de exposición del poblado Ensenada a los peligros del volcán Calbuco. Elaboración propia.

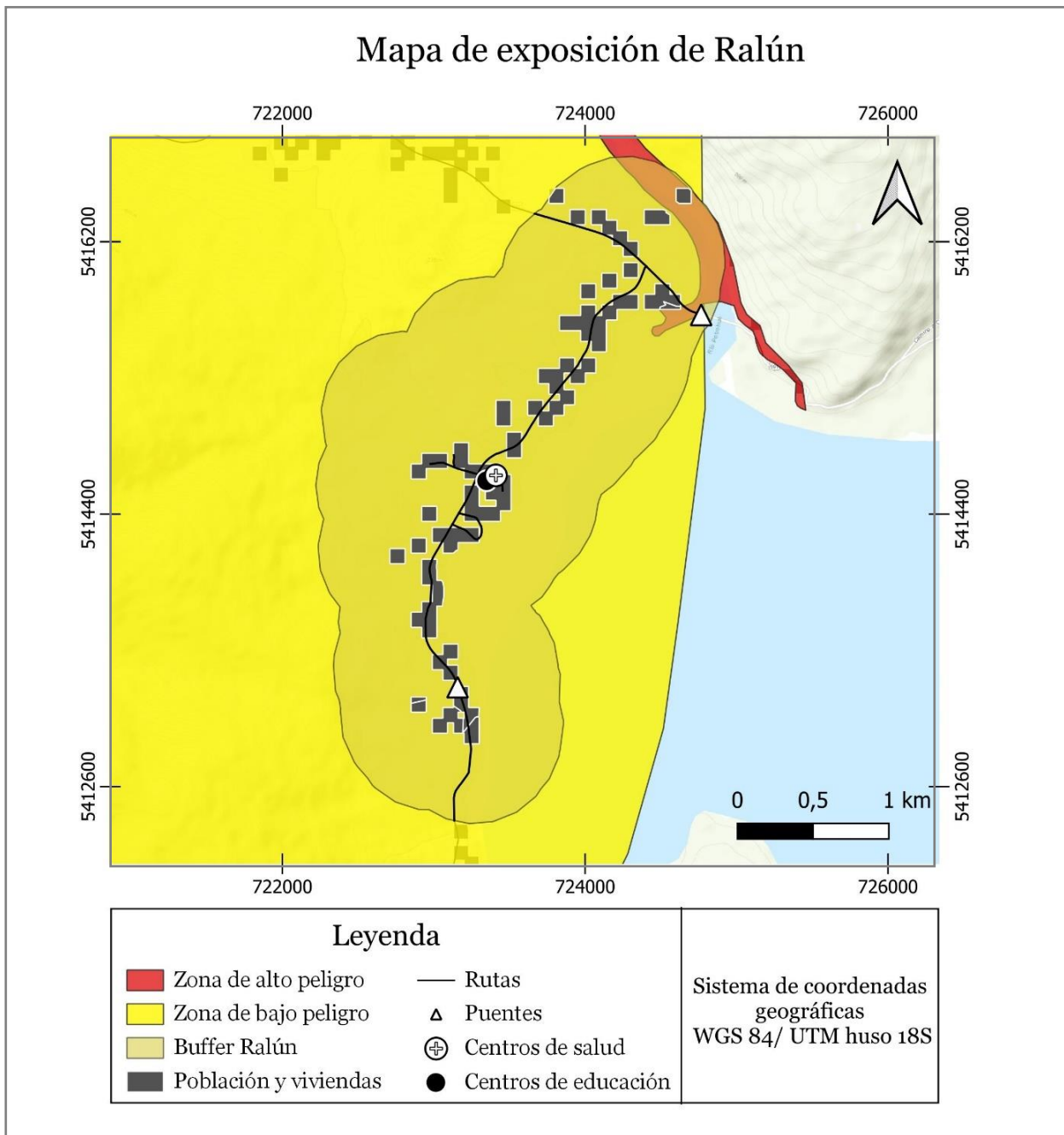


Figura 14. Mapa de exposición del poblado Ralún. Elaboración propia.

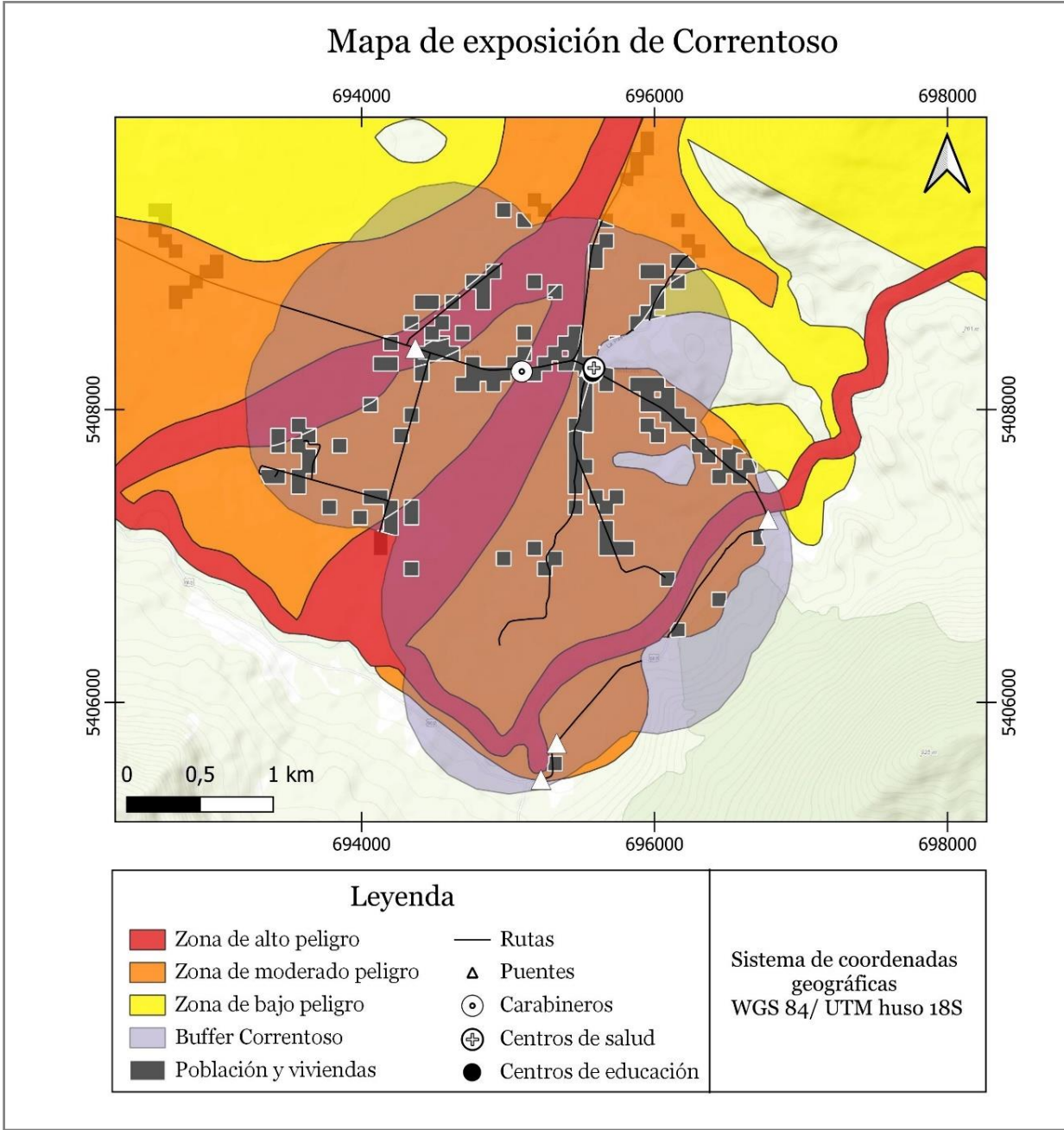


Figura 15. Mapa de exposición del poblado Correntoso. Elaboración propia.

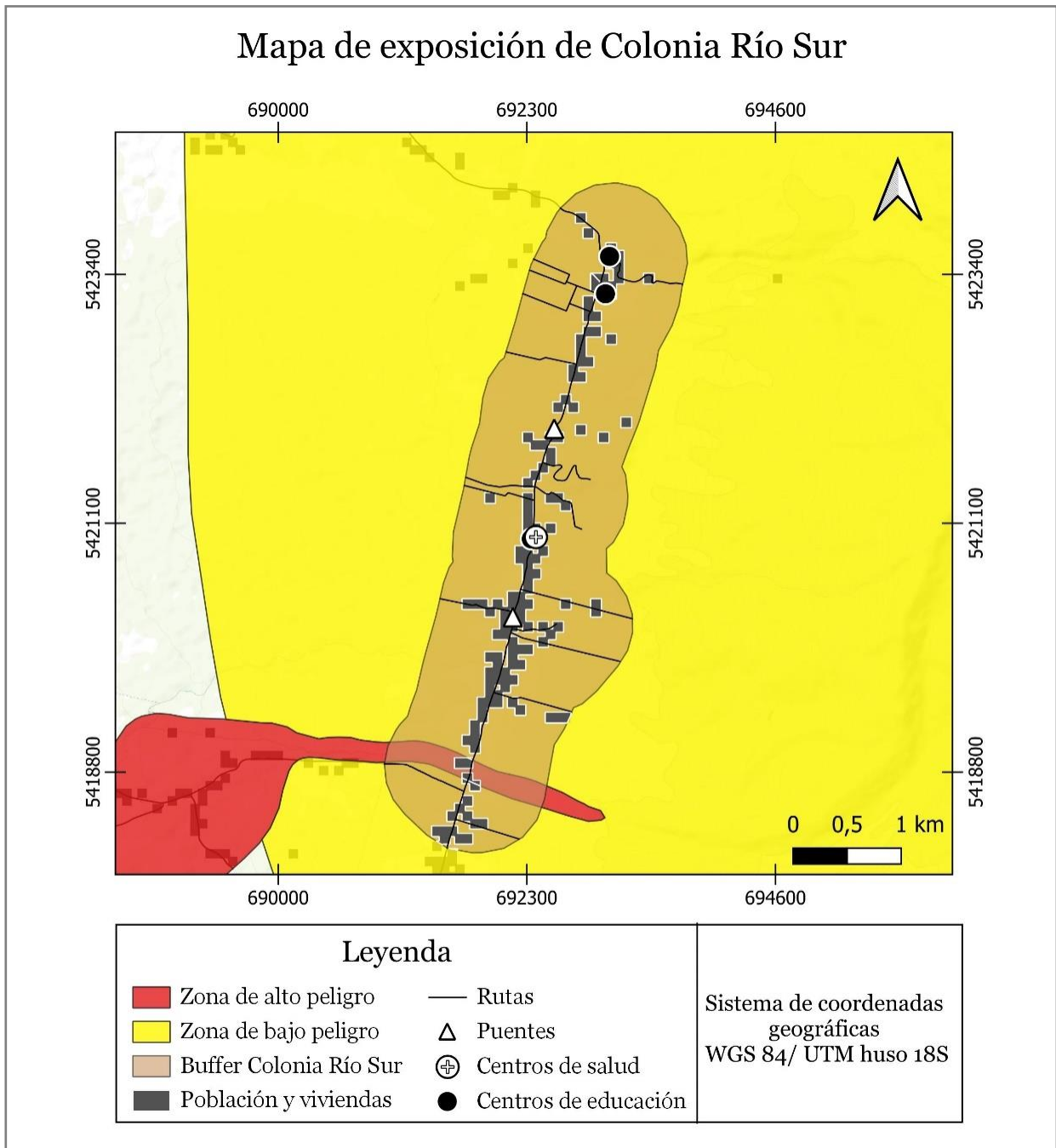


Figura 16. Mapa de exposición del poblado Colonia Río Sur. Elaboración propia.

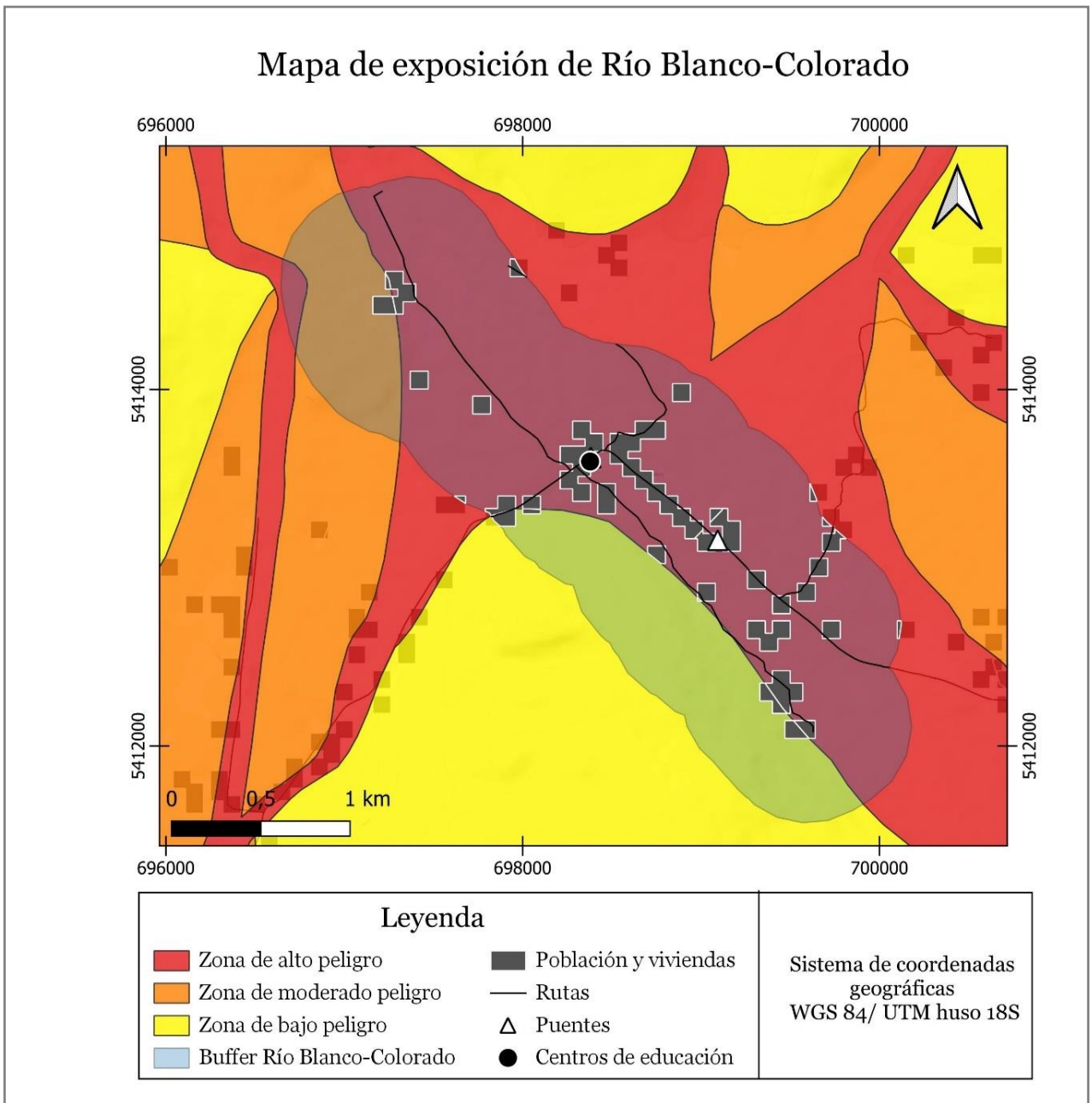


Figura 17. Mapa de exposición del poblado Río Blanco-Colorado. Elaboración propia.

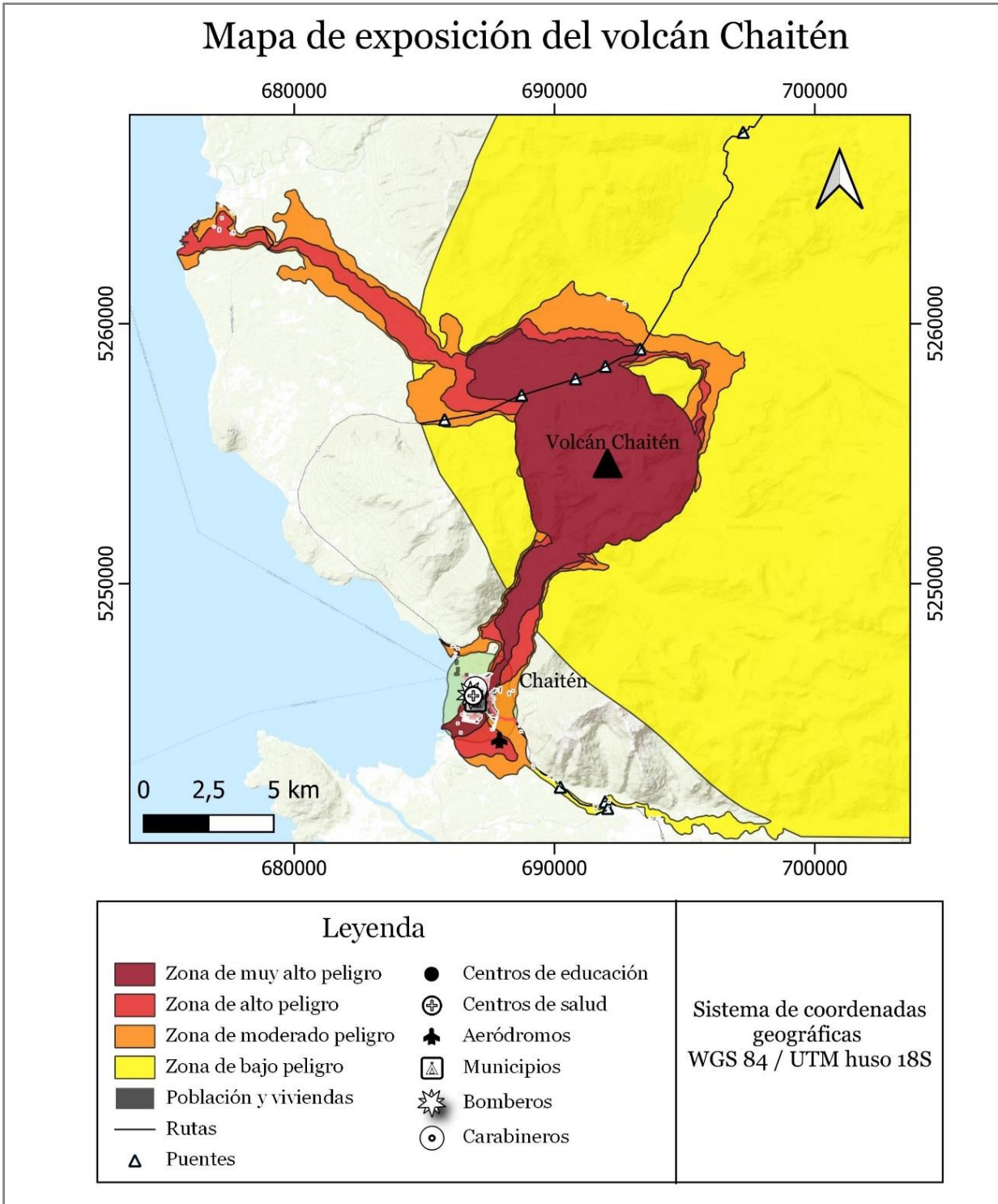


Figura 18. Mapa de exposición del volcán Chaitén. Elaboración propia.

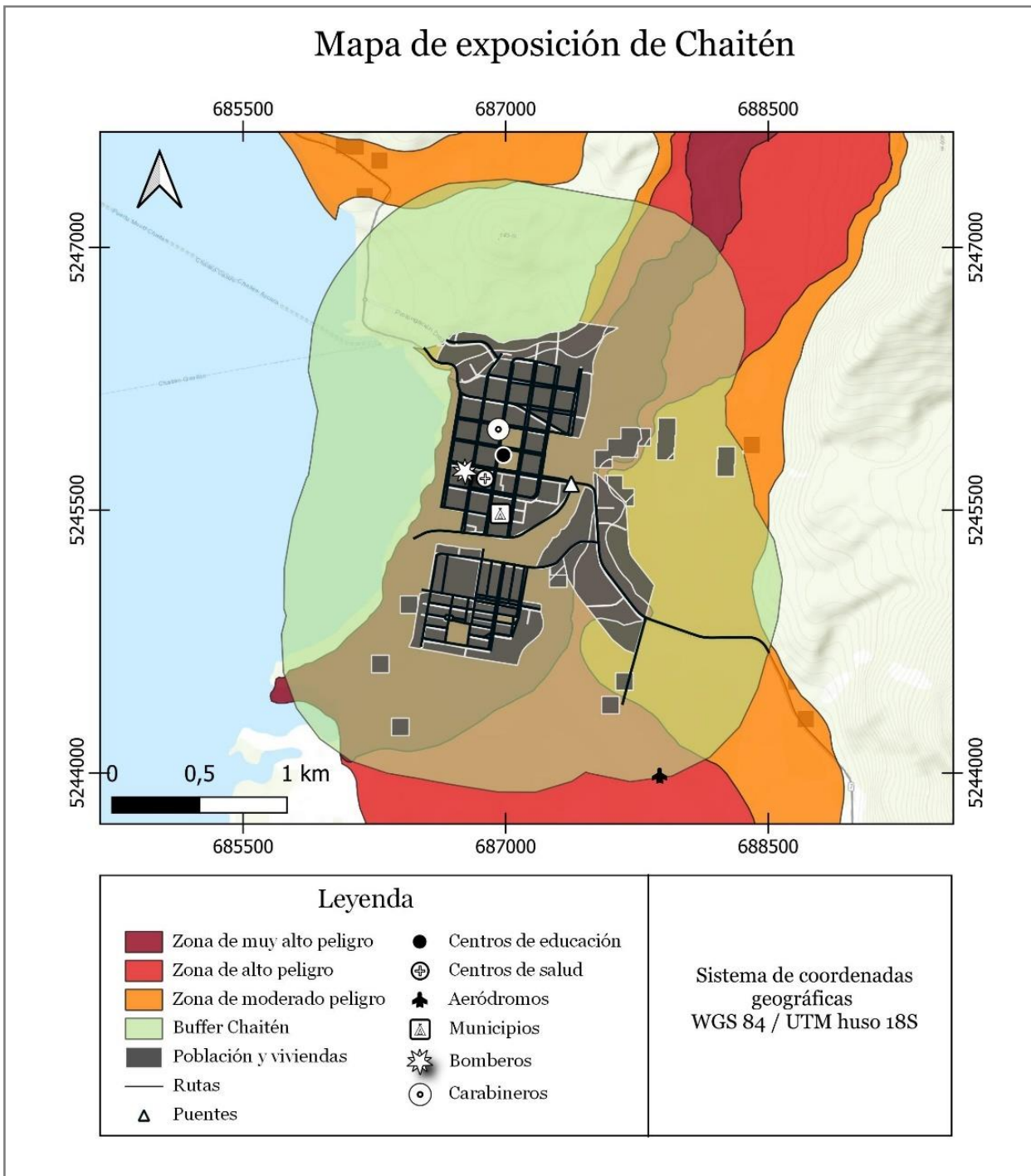


Figura 19. Mapa de exposición del poblado Chaitén. Elaboración propia.

Mapa de exposición del volcán Hudson

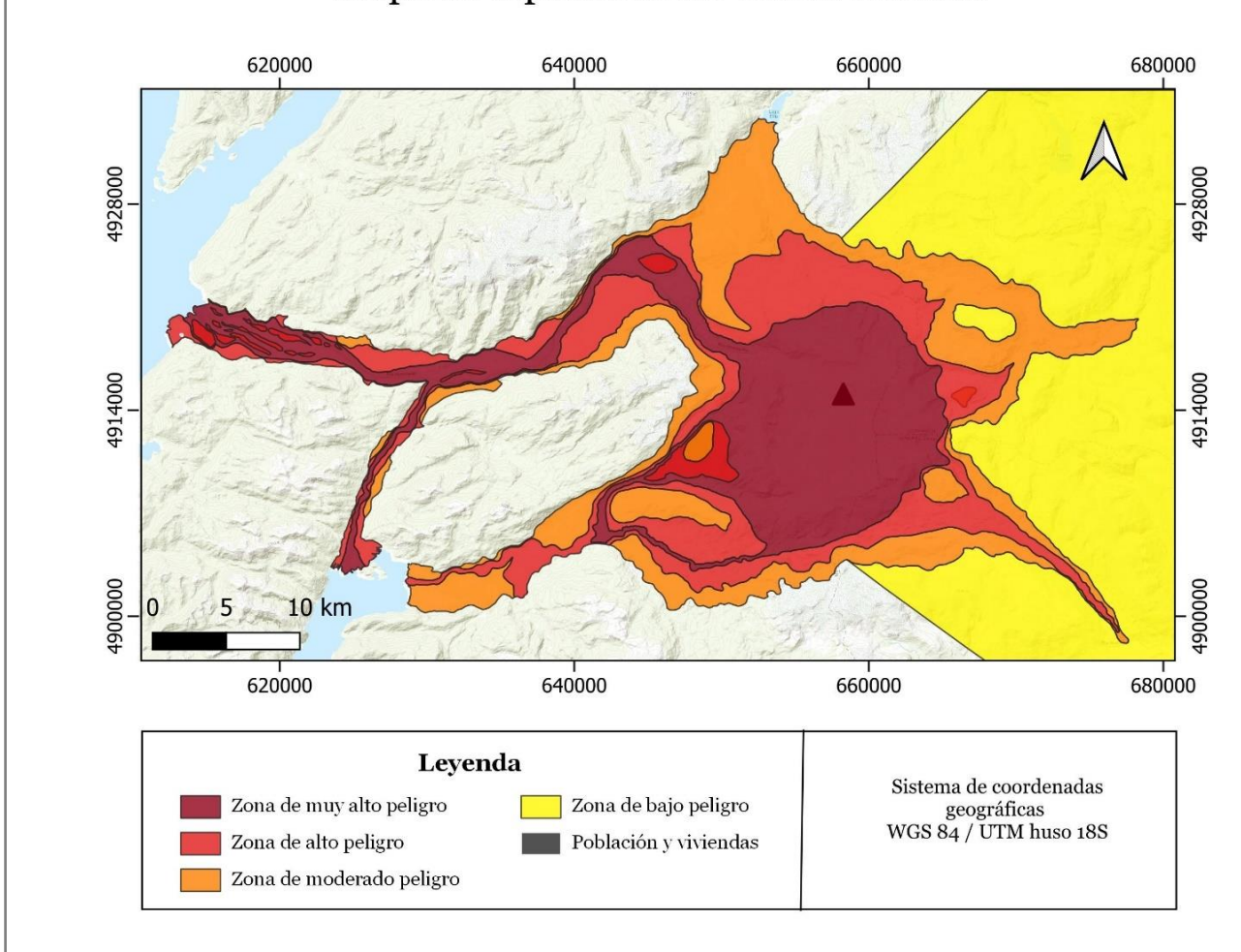


Figura 20. Mapa de exposición del volcán Hudson. Elaboración propia.

ANEXO 2. AMENAZA ABSOLUTA Y NORMALIZADA DE SISTEMAS VOLCÁNICOS Y POBLADOS POR NIVEL DE PELIGRO

Tabla 1. Amenaza absoluta de sistemas volcánicos por nivel de peligro.

Sistema volcánico	Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto	Amenaza absoluta
Chaitén	0	3559,87	143005,80	232162,99	4852765,9	5231494,59
Quetrupillán	0	475756,15	1209738,73	3380940,90	0	5066435,78
Calbuco	0	797917,96	881053,15	1644838,78	76561,37	3400371,26
Osorno	0	245200,34	222311,71	2052892,37	0	2520404,42
Taapacá	0	1230,37	4646,91	1575179,85	0	1581057,13
Tupungatito	0	780,02	37579,80	256100,85	11050,02	305510,69
Planchón-Peteroa	0	64871,87	0	0	0	64871,87
Hudson	0	0	0	14700,54	0	14700,54
San. Pedro	0	2775,59	2045,52	4946,26	0	9767,38
Cerro Azul-Quizapu	0	0	0	0	0	0

Tabla 2. Amenaza normalizada de sistemas volcánicos por nivel de peligro.

Sistema volcánico	Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto	Amenaza normalizada
Chaitén	0	2,13	85,70	139,13	2908,24	3135,21
Hudson	0	0	0	2100	0	2100
Osorno	0	137,77	124,91	1153,45	0	1416,13
Tupungatito	0	3,08	148,51	1012,08	43,67	1207,34
Calbuco	0	234,45	258,87	483,29	0	976,61
Taapacá	0	0,70	2,65	898,82	0	902,18
Quetrupillán	0	73,42	186,69	521,75	0	781,86
San. Pedro	0	157,46	116,04	280,60	0	554,10
Planchón-Peteroa	0	350	0	0	0	350
Cerro Azul-Quizapu	0	0	0	0	0	0

Tabla 3. Amenaza absoluta de poblados por nivel de peligro.

Poblados	Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto	Amenaza absoluta
Chaitén	0	0	122404,95	224133,57	4852622	5199160,53
Las Cascadas	0	26240,77	66,70	1709996,66	0	1736304,13
Putre	0	0	0	1558913,60	0	1558913,60
Curarrehue	0	315166,13	53281,00	1075248,95	0	1443696,08
Ensenada	0	222476,45	176492,12	621639,39	0	1020607,97
Correntoso	0	2940,04	507878,44	140825,63	0	651644,11
Colonia Río Sur	0	137471,67	0	16800,21	0	154271,88
Ralún	0	86989,81	0	6300,54	0	93290,35
Río Blanco-Colorado	0	1680,18	1260,06	80191,60	0	83131,84
Los Queñes	0	49114,06	0	0	0	49114,06

Tabla 4. Amenaza normalizada de poblados por nivel de peligro.

Poblados	Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto	Amenaza normalizada
Chaitén	0	0	72,50	132,76	2874,27	3079,53
Las Cascadas	0	29,22	0,07	1903,92	0	1933,21
Río Blanco-Colorado	0	38,92	29,19	1857,54	0	1925,64
Correntoso	0	5,70	984,03	272,85	0	1262,59
Ensenada	0	270,49	214,58	755,81	0	1240,89
Putre	0	0	0	900	0	900
Curarrehue	0	138,04	23,34	470,94	0	632,31
Colonia Río Sur	0	409,99	0	50,10	0	460,09
Ralún	0	414,00	0	29,99	0	443,99
Los Queñes	0	204,40	0	0	0	204,40

ANEXO 3. DETALLE DE LA EVALUACIÓN DE LA POBLACIÓN EN SISTEMAS VOLCÁNICOS POR NIVEL DE PELIGRO

Tabla 5. Exposición de personas en sistemas volcánicos por nivel de peligro

Sistema volcánico	Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto	Exposición
Quetrupillán	0	1982	1680	2817	0	6479
Calbuco	0	1899	699	783	21	3189
Osorno	0	598	180	1001	0	1799
Taapacá	0	2	0	1750	0	1752
Chaitén	0	6	119	116	1427	1646
Tupungatito	0	3	48	197	5	465
Planchón-Peteroa	0	185	0	0	0	231
San Pedro	0	11	0	0	0	11
Hudson	0	0	0	7	0	7
Cerro Azul-Quizapu	0	0	0	0	0	0

Tabla 6. Amenaza absoluta de personas en sistemas volcánicos por nivel de peligro.

Sistema volcánico	Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto	Amenaza absoluta
Chaitén	0	2400	142800	232000	4851800	5229000
Quetrupillán	0	475680	1209600	3380400	0	5065680
Calbuco	0	797580	880740	1644300	74970	3397590
Osorno	0	245180	221400	2052050	0	2518630
Taapacá	0	360	0	1575000	0	1599660
Tupungatito	0	780	37440	256100	11050	305370
Planchón-Peteroa	0	64750	0	0	0	64750
Hudson	0	0	0	14700	0	14700
San Pedro	0	2420	0	0	0	2420
Cerro Azul-Quizapu	0	0	0	0	0	0

Tabla 7. Amenaza normalizada de personas en sistemas volcánicos por nivel de peligro.

Sistema volcánico	Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto	Amenaza normalizada
Chaitén	0	1,439	85,61	139,09	2908,75	3134,89
Hudson	0	0	0	2100	0	2100
Osorno	0	137,82	124,45	1153,49	0	1415,76
Tupungatito	0	3,08	147,98	1012,25	43,68	1207,00
Calbuco	0	234,44	258,89	483,33	22,04	998,70
Taapacá	0	0,21	0	898,97	0	899,18
Quetrupillán	0	73,42	186,70	521,75	0	781,86
Planchón-Peteroa	0	350	0	0	0	350
San Pedro	0	220	0	0	0	220
Cerro Azul-Quizapu	0	0	0	0	0	0

ANEXO 4. DETALLE DE LA EVALUACIÓN DE INFRAESTRUCTURAS EN SISTEMAS VOLCÁNICOS POR NIVEL DE PELIGRO

Tabla 8. Exposición de infraestructuras en sistemas volcánicos por nivel de peligro.

Sistema volcánico	Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto	Exposición
Quetrupillán	0	35,47	25,44	50,40	0	111,31
Calbuco	0	55,29	18,64	20,05	4,35	98,33
Osorno	0	7,70	16,35	28,68	0	52,74
Chaitén	0	6,57	6,39	4,35	28,48	45,79
Taapacá	0	6,54	8,61	26,45	0	41,59
San Pedro	0	6,18	3,10	4,50	0	13,77
Planchón-Peteroa	0	11,36	0	0	0	11,36
Tupungatito	0	0,02	4,15	0,51	0,01	4,69
Hudson	0	0	0	0,06	0	0,06
Cerro Azul-Quizapu	0	0	0	0	0	0

Tabla 9. Amenaza absoluta de infraestructuras en sistemas volcánicos por nivel de peligro.

Sistema volcánico	Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto	Amenaza absoluta
Chaitén	0	2629,20	7669,41	8697,99	96818,56	115815,17
Calbuco	0	23220,96	23488,39	42096,53	15528,77	104334,65
Quetrupillán	0	8511,91	18320,14	60474,72	0	87306,78
Osorno	0	3158,56	20113,11	58803,59	0	82075,26
Taapacá	0	1176,52	4646,91	23802,54	0	29625,97
San Pedro	0	1359,24	2045,52	4946,26	0	8351,02
Planchón-Peteroa	0	3974,58	0	0	0	3974,58
Tupungatito	0	5,79	3238,47	659,68	22,1	3926,05
Hudson	0	0	0	126	0	126
Cerro Azul-Quizapu	0	0	0	0	0	0

Tabla 10. Amenaza normalizada de infraestructuras en sistemas volcánicos por nivel de peligro.

Sistema volcánico	Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto	Amenaza normalizada
Chaitén	0	57,42	167,49	189,96	2114,44	2529,31
Hudson	0	0	0	2100	0	2100
Osorno	0	59,89	381,36	1114,96	0	1556,21
Calbuco	0	236,16	238,88	428,14	157,93	1061,12
Tupungatito	0	1,23	690,27	140,61	4,71	832,11
Quetrupillán	0	76,47	164,59	543,32	0	784,38
Taapacá	0	28,29	111,73	572,33	0	712,35
San Pedro	0	98,68	148,50	359,10	0	606,28
Planchón-Peteroa	0	350	0	0	0	350
Cerro Azul-Quizapu	0	0	0	0	0	0

ANEXO 5. DETALLE DE LA EVALUACIÓN DE LA POBLACIÓN EN POBLADOS POR NIVEL DE PELIGRO

Tabla 11. Exposición de personas en poblados por nivel de peligro.

Poblado	Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto	Exposición
Curarrehue	0	1313	74	896	0	2283
Putre	0	0	0	1732	0	1732
Chaitén	0	0	102	112	1427	1641
Ensenada	0	531	141	296	0	968
Las Cascadas	0	64	0	834	0	898
Correntoso	0	7	403	67	0	477
Colonia Río Sur	0	327	0	8	0	335
Ralún	0	207	0	3	0	210
Los Queñes	0	140	0	0	0	140
Río Blanco-Colorado	0	4	1	38	0	43

Tabla 12. Amenaza absoluta de personas en poblados por nivel de peligro.

Poblados	Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto	Amenaza absoluta
Chaitén	0	0	122400	224000	4851800	5198200
Las Cascadas	0	26240	0	1709700	0	1735940
Putre	0	0	0	1558800	0	1558800
Curarrehue	0	315120	53280	1075200	0	1443600
Ensenada	0	222300	175440	621600	0	1019340
Correntoso	0	2940	507780	140700	0	651420
Colonia Río Sur	0	137340	0	16800	0	154140
Ralún	0	86940	0	6300	0	93240
Río Blanco-Colorado	0	1680	1260	79800	0	82740
Los Queñes	0	49000	0	0	0	49000

Tabla 13. Amenaza normalizada de personas en poblados por nivel de peligro.

Poblados	Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto	Amenaza normalizada
Chaitén	0	0	72,51	132,70	2874,29	3079,50
Las Cascadas	0	29,22	0	1903,90	0	1933,12
Río Blanco-Colorado	0	39,07	29,30	1855,81	0	1924,19
Correntoso	0	5,70	984,07	272,67	0	1262,44
Ensenada	0	270,44	213,43	756,20	0	1240,07
Putre	0	0	0	900	0	900
Curarrehue	0	138,03	23,34	470,96	0	632,33
Colonia Río Sur	0	409,97	0	50,15	0	460,12
Ralún	0	414	0	30	0	444
Los Queñes	0	204,17	0	0	0	204,17

ANEXO 6. DETALLE DE LA EVALUACIÓN DE LAS INFRAESTRUCTURA EN POBLADOS POR NIVEL DE PELIGRO

Tabla 14. Exposición de infraestructuras en poblados por nivel de peligro.

Poblados	Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto	Exposición
Ensenada	0	21,11	15,61	3,33	0	40,05
Curarrehue	0	22,47	0,45	8,55	0	31,47
Chaitén	0	0	0,92	3,87	26,27	31,05
Putre	0	0	0	20,91	0	20,91
Las Cascadas	0	0,49	0,05	15,54	0	16,08
Colonia Río Sur	0	14,32	0	0,04	0	14,36
Correntoso	0	0,04	7,94	2,83	0	10,80
Los Queñes	0	9,56	0	0	0	9,56
Ralún	0	7,01	0	0,04	0	7,05
Río Blanco-Colorado	0	0,06	0,01	3,77	0	3,84

Tabla 15. Amenaza absoluta de infraestructuras en poblados por nivel de peligro.

Poblados	Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto	Amenaza absoluta
Chaitén	0	0	1100,44	7736,75	89314,83	98152,02
Ensenada	0	8858,89	19242,56	6998,28	0	35099,73
Las Cascadas	0	201,00	66,70	31850,96	0	32118,66
Curarrehue	0	5391,94	326,98	10260,01	0	15978,93
Correntoso	0	14,87	9999,14	5947,11	0	15961,12
Putre	0	0	0	18819,48	0	18819,48
Río Blanco-Colorado	0	24,64	12,6	7915,35	0	7952,60
Colonia Río Sur	0	6015,43	0	83,44	0	6098,87
Ralún	0	2943,33	0	82,62	0	3025,95
Los Queñes	0	3345,35	0	0	0	3345,35

Tabla 16. Amenaza normalizada de infraestructuras en poblados por nivel de peligro.

Poblados	Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto	Amenaza normalizada
Chaitén	0	0	34,79	244,57	2823,32	3102,67
Río Blanco-Colorado	0	6,42	3,28	2062,42	0	2072,13
Las Cascadas	0	12,50	4,15	1980,59	0	1997,24
Correntoso	0	1,34	902,41	536,72	0	1440,47
Ensenada	0	352,95	766,65	278,82	0	1398,42
Putre	0	0	0	900	0	900
Curarrehue	0	171,33	10,39	326,02	0	507,74
Ralún	0	417,66	0	11,72	0	429,38
Colonia Río Sur	0	418,84	0	5,81	0	424,65
Los Queñes	0	287,25	0	0	0	287,25

ANEXO 7. DETALLE DE LA EVALUACIÓN DE INFRAESTRUCTURAS CRÍTICAS EN SISTEMAS VOLCÁNICOS Y POBLADOS

Tabla 17. Exposición de infraestructuras críticas en sistemas volcánicos.

Sistemas volcánicos	Centros de educación	Centros de salud	Municipios	Bomberos	Carabineros	Hidroeléctricas	Rutas	Puentes	Aeródromos	Exposición
Quetrupillán	31	10	4	4	4	0	22,55	6,35	0	81,90
Calbuco	20	15	0	0	4	7	22,70	4,7	3	76,40
Osorno	12	9	0	2	4	0	13,33	2,15	0	42,48
Chaitén	3	5	4	2	2	0	12,51	3,65	6	38,16
Taapacá	5	4	4	0	2	0	20,90	0	0	35,90
San Pedro	0	0	0	0	0	0	13,68	0	0	13,68
Planchón-Peteroa	0	3	0	2	2	0	1,91	0,25	0	9,16
Tupungatito	0	0	0	0	0	4	0,11	0,1	0	4,21
Hudson	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Co Azul-Quizapu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 18. Exposición de infraestructuras críticas en poblados.

Poblados	Centros de educación	Centros de salud	Municipios	Bomberos	Carabineros	Hidroeléctricas	Rutas	Calles	Puentes	Aeródromos	Exposición
Ensenada	10	6	0	0	4	0	11,13	2,07	0,6	0	33,80
Chaitén	3	5	4	2	2	0	1,30	1,29	2	3	23,59
Curarrehue	8	4	4	2	2	0	1,29	0,27	0,05	0	21,61
Putre	5	4	4	0	2	0	0,09	0,44	0	0	15,53
Colonia Río Sur	9	3	0	0	0	0	0,36	0,55	0,1	0	13,01
Las Cascadas	3	3	0	2	2	0	0,48	0,31	0,2	0	10,99
Correntoso	2	3	0	0	2	0	0,81	0,38	0,4	0	8,58
Los Queñes	0	3	0	2	2	0	0,43	0,13	0,25	0	7,81
Ralún	2	3	0	0	0	0	0,48	0,06	0,25	0	5,79
Río Blanco-Colorado	2	0	0	0	0	0	0,55	0,28	0,4	0	3,24

ANEXO 8. DETALLE DE LAS RUTAS AMENAZADAS POR LOS DISTINTOS NIVELES DE PELIGRO VOLCÁNICO DE LOS CENTROS ERUPTIVOS EVALUADOS.

Tabla 19. Rutas expuestas a los peligros del complejo volcánico Taapacá.

Sistema volcánico	Ruta	Tipo	Longitud	Exposición	Nivel de peligro	Amenaza
Taapacá	A-23	Camino Regional Principal	16167,05	3,23	Alto	323,34
	A-125	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	345,44	0,02	Alto	1,73
	A-147	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	3095,59	0,15	Alto	15,48
	A-149	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	6009,43	0,30	Alto	30,05
	11 CH	Ruta Internacional	6971,14	2,09	Alto	209,13
	A-23	Camino Regional Principal	11014,36	2,20	Bajo	44,06
	A-125	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	23705,46	1,19	Bajo	23,71
	A-125	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	10356,26	0,52	Bajo	10,36
	A-147	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	480,10	0,02	Bajo	0,48
	A-151	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	1243,86	0,06	Bajo	1,24
	A-155	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	11227,86	0,56	Bajo	11,23
	A-157	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	1348,99	0,07	Bajo	1,35
	S/R	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	1135,66	0,06	Bajo	1,14
	A-113	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	2922,27	0,15	Bajo	2,92
	11 CH	Ruta Internacional	7300,46	2,19	Bajo	43,80
	A-23	Camino Regional Principal	3590,21	0,72	Moderado	43,08
	A-125	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	2253,26	0,11	Moderado	3,74
	11 CH	Ruta Internacional	99,45	0,03	Moderado	1,79

Tabla 20. Rutas expuestas a los peligros del volcán San Pedro.

Sistema volcánico	Ruta	Tipo	Longitud	Exposición	Nivel de peligro	Amenaza
San Pedro	21-CH	Ruta Internacional	14988,67	4,50	Alto	449,66
	21-CH	Ruta Internacional	202,95	0,06	Bajo	1,22
	B-145	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	5222,46	0,26	Moderado	15,67
	21-CH	Ruta Internacional	9460,51	2,84	Moderado	170,29

Tabla 21. Rutas expuestas a los peligros del volcán Tupungatito.

Sistema volcánico	Ruta	Tipo	Longitud	Exposición	Nivel de peligro	Amenaza
Tupungatito	G-345	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	948,98	0,05	Alto	4,74
	G-345	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	1037,80	0,05	Bajo	1,04
	G-345	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	245,20	0,01	Moderado	0,74

Tabla 22. Rutas expuestas a los peligros del complejo volcánico Planchón-Peteroa.

Sistema volcánico	Ruta	Tipo	Longitud	Exposición	Nivel de peligro	Amenaza
Planchón-Peteroa	J-55	Camino Regional Principal	1342,84	0,27	Bajo	5,37
	J-55	Camino Regional Principal	2162,85	0,43	Bajo	8,65
	J-25	Camino Regional Principal	4440,71	0,89	Bajo	17,76
	J-577	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	2681,88	0,13	Bajo	2,68
	J-585	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	968,68	0,05	Bajo	0,97

Tabla 23. Rutas expuestas a los peligros del complejo volcánico Quetrupillán.

Sistema volcánico	Ruta	Tipo	Longitud	Exposición	Nivel de peligro	Amenaza
Quetrupillán	S-963	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	1415,37	0,07	Alto	7,08
	S-991	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	924,62	0,05	Alto	4,62
	S-977	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	1520,21	0,08	Alto	7,60
	S-989	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	6925,18	0,35	Alto	34,63
	S-941	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	6325,92	0,32	Alto	31,63
	S-939	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	3719,37	0,19	Alto	18,60
	S-959	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	360,14	0,02	Alto	1,80
	S-947	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	8643,92	0,43	Alto	43,22
	S-987	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	1059,09	0,05	Alto	5,30
	S-935	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	2985,99	0,15	Alto	14,93
	S-983	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	5205,00	0,26	Alto	26,03
	S-971	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	1043,32	0,05	Alto	5,22
	S-923	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	1407,66	0,07	Alto	7,04
	S-951	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	159,58	0,01	Alto	0,80
	S/R	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	3907,43	0,20	Alto	19,54
	S-965	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	667,10	0,03	Alto	3,34
	199-CH	Ruta Internacional	120,40	0,04	Alto	3,61
	199-CH	Ruta Internacional	2086,09	0,63	Alto	62,58
	199-CH	Ruta Internacional	23982,09	7,19	Alto	719,46
	199-CH	Ruta Internacional	1102,76	0,33	Alto	33,08
	S-981	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	6126,59	0,31	Bajo	6,13
	S-977	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	6514,46	0,17	Bajo	3,31
	S-965	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	2391,45	0,12	Bajo	2,39
	S-969	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	6269,99	0,31	Bajo	6,27
	S-947	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	3735,16	0,19	Bajo	3,74
	S-983	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	7387,69	0,37	Bajo	7,39
199-CH	Ruta Internacional	192,03	0,06	Bajo	1,15	

	199-CH	Ruta Internacional	20482,76	6,14	Bajo	122,90
	S-935	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	3282,72	0,16	Moderado	9,85
	S-947	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	3054,19	0,15	Moderado	9,16
	S-963	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	87,59	0,00	Moderado	0,26
	S-951	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	299,87	0,01	Moderado	0,90
	199-CH	Ruta Internacional	737,13	0,22	Moderado	13,27

Tabla 24. Rutas expuestas a los peligros del volcán Osorno.

Sistema volcánico	Ruta	Tipo	Longitud	Exposición	Nivel de peligro	Amenaza
Osorno	U-99-V	Camino Regional Principal	11349,25	2,27	Alto	226,99
	U-965	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	609,96	0,03	Alto	3,05
	U-963	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	9790,67	0,49	Alto	48,95
	V-555	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	7926,52	0,40	Alto	39,63
	225-CH	Ruta Internacional	4911,22	1,47	Alto	147,34
	225-CH	Ruta Internacional	3988,50	1,20	Alto	119,65
	U-99-V	Camino Regional Principal	5646,49	1,13	Bajo	22,59
	U-965	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	12,67	0,00	Bajo	0,01
	U-963	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	8176,52	0,41	Bajo	8,18
	V-695	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	638,60	0,03	Bajo	0,64
	225-CH	Ruta Internacional	1807,25	0,54	Bajo	10,84
	V-69	Camino Regional Principal	5183,05	1,04	Moderado	62,20
	U-99-V	Camino Regional Principal	8479,77	1,70	Moderado	101,76
	V-695	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	143,43	0,01	Moderado	0,43
	V-555	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	4340,25	0,22	Moderado	13,02
	225-CH	Ruta Internacional	6244,66	1,87	Moderado	112,40

Tabla 25. Rutas expuestas a los peligros del volcán Calbuco.

Sistema volcánico	Ruta	Tipo	Longitud	Exposición	Nivel de peligro	Amenaza
Calbuco	V-69	Camino Regional Principal	5451,27	1,09	Alto	109,03
	V-65	Camino Regional Principal	9040,19	1,81	Alto	180,80
	S/R	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	1795,59	0,09	Alto	8,98
	S/R	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	851,16	0,04	Alto	4,26
	S/R	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	1052,00	0,05	Alto	5,26
	V-615	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	1159,48	0,06	Alto	5,80
	V-657	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	191,32	0,01	Alto	0,96
	V-611	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	99,98	0,00	Alto	0,50
	V-655	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	1805,02	0,09	Alto	9,03
	V-621	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	2905,60	0,15	Alto	14,53
	V-613	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	3265,98	0,16	Alto	16,33
	V-623	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	4831,96	0,24	Alto	24,16
	V-615	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	1042,94	0,05	Alto	5,21
	225-CH	Ruta Internacional	3970,95	1,19	Alto	119,13
	V-69	Camino Regional Principal	20601,54	4,12	Bajo	82,41
	V-65	Camino Regional Principal	2880,55	0,58	Bajo	11,52
	U-99-V	Camino Regional Principal	2905,65	0,58	Bajo	11,62
	V-619	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	13487,43	0,67	Bajo	13,49
	V-615	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	1595,48	0,08	Bajo	1,60
	V-611	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	1747,43	0,09	Bajo	1,75
	V-621	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	782,21	0,04	Bajo	0,78
	V-613	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	10282,93	0,51	Bajo	10,28
	V-775	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	7208,40	0,36	Bajo	7,21
	V-623	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	457,45	0,02	Bajo	0,46
	V-695	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	609,25	0,03	Bajo	0,61
	V-555	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	942,19	0,05	Bajo	0,94
225-CH	Ruta Internacional	17017,16	5,11	Bajo	102,10	

V-69	Camino Regional Principal	2088,18	0,42	Moderado	25,06
V-65	Camino Regional Principal	7157,03	1,43	Moderado	85,88
S/R	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	36,08	0,00	Moderado	0,11
V-619	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	857,24	0,04	Moderado	2,57
V-657	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	3771,73	0,19	Moderado	11,32
V-695	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	2497,48	0,12	Moderado	7,49
225-CH	Ruta Internacional	1433,69	0,43	Moderado	25,81

Tabla 26. Rutas expuestas a los peligros del volcán Chaitén.

Sistema volcánico	Ruta	Tipo	Longitud	Exposición	Nivel de peligro	Amenaza
Chaitén	S/R	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	170,47	0,01	Alto	0,85
	W-865	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	55,98	0,00	Alto	0,28
	Ruta 7	Ruta Nacional Longitudinal	1967,53	0,79	Alto	78,70
	W-871	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	788,91	0,04	Bajo	0,79
	Ruta 7	Ruta Nacional Longitudinal	13100,86	5,24	Bajo	104,81
	S/R	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	889,67	0,04	Moderado	2,67
	W-865	Camino Regional, provincial, comunales y de acceso	454,69	0,02	Moderado	1,36
	Ruta 7	Ruta Nacional Longitudinal	5745,97	2,30	Moderado	137,90
	Ruta 7	Ruta Nacional Longitudinal	6916,41	2,77	Muy alto	470,32

ANEXO 9. REGISTRO DE ERUPCIONES DE LOS SISTEMAS VOLCÁNICOS DE ESTUDIO.

Tabla 27. Erupciones históricas del volcán San Pedro. En amarillo se destacan las consideradas para esta evaluación. RS: Ruidos subterráneos. SV: Sismos volcánicos. EX: Explosiones. CG: Columna de gases y ceniza. EP: Eyección de piroclastos. FL: Flujo de lava. LH: Lahares. AR: Aumento del caudal de los ríos. DR: Derrumbes. AC: Altura de la columna eruptiva.

Sistema volcánico	n.º	Fechas (Día/Mes/Año)		Características principales de la actividad eruptiva									AC (metros)	VEI	
		Inicio	Término	RS	SV	EX	CG	EP	FL	LH	AR	DR			
San Pedro	1	02/12/1960	1960	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	?	2
	2	1959	?	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	?	1
	3	1938	?	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	?	2
	4	1923	1924	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	?	?
	5	1917	?	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	?	?
	6	02/09/1911	?/11/1911	-	-	X	X	X	-	-	-	-	-	?	?
	7	25/05/1901	?/10/1901	X	X	X	X	X	-	-	-	-	-	> 1.000	1
	8	25/05/1891	26/05/1891	-	X	X	X	X	-	-	-	-	-	> 1.000	1
	9	1876	?/05/1877	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	> 1.000	1
	10	20/02/1870	?	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	?	?

Tabla 28. Erupciones históricas del volcán Tupungatito. En amarillo se destacan las consideradas para esta evaluación. RS: Ruidos subterráneos. SV: Sismos volcánicos. EX: Explosiones. CG: Columna de gases y ceniza. EP: Eyección de piroclastos. FL: Flujo de lava. LH: Lahares. AR: Aumento del caudal de los ríos. DR: Derrumbes. AC: Altura de la columna eruptiva.

Sistema volcánico	n.º	Fechas (Día/Mes/Año)		Características principales de la actividad eruptiva									AC (metros)	VEI	
		Inicio	Término	RS	SV	EX	CG	EP	FL	LH	AR	DR			
Tupungatito	1	28/11/1987	30/11/1987	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	2
	2	20/01/1986	20/01/1986	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	?	1
	3	10/01/1980	11/01/1980	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	?	2
	4	1968	?	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	?	2
	5	03/08/1964	19/09/1964	-	-	X	X	X	-	-	-	-	-	> 1.000	2
	6	05/05/1961	15/08/1961	-	-	X	X	X	-	-	-	-	-	> 1.000	2
	7	07/07/1960	09/07/1960	-	-	X	X	X	X	-	-	-	-	?	2
	8	26/03/1959	16-10-1959	-	-	X	X	X	X	-	-	-	-	> 1.000	2

9	?/01/1958	?	-	-	X	X	X	-	-	-	-	?	2
10	1946	1947	-	-	-	-	-	-	-	-	-	?	2
11	09-06-1942	?	-	-	X	X	X	-	-	-	-	?	2
12	?/02/1925	?	-	-	X	-	-	-	-	-	-	?	2
13	10/02/1907	15/02/1907	-	-	X	X	X	-	-	-	-	< 1.000	1
14	?/04/1901	?	-	-	X	X	X	-	-	-	-	?	2
15	1898	?	-	-	X	-	-	-	-	-	-	?	2
16	?/01/1897	12/04/1897	-	-	X	X	X	-	-	-	-	?	2
17	1889	1890	-	-	-	-	-	-	-	-	-	?	2
18	20/03/1861	12/09/1862	-	-	X	X	X	-	-	-	-	> 1.000	1
19	1849	?/09/1852	-	-	-	-	-	-	-	-	-	?	2
20	19/01/1835	20/01/1835	-	-	X	X	X	-	-	-	-	?	2
21	26/09/1829	?	-	-	X	-	-	-	-	-	-	?	2
22	1787	?	-	-	X	X	X	?	-	-	-	?	2
23	1751	?	-	-	X	X	X	-	-	-	-	?	2
24	1674	?	-	-	X	X	X	-	-	-	-	?	2
25	1646	?	-	-	X	X	X	-	-	-	-	?	2

Tabla 29. Erupciones históricas del complejo volcánico Planchón-Peteroa. En amarillo se destacan las consideradas para esta evaluación. RS: Ruidos subterráneos. SV: Sismos volcánicos. EX: Explosiones. CG: Columna de gases y ceniza. EP: Eyección de piroclastos. FL: Flujo de lava. LH: Lahares. AR: Aumento del caudal de los ríos. DR: Derrumbes. AC: Altura de la columna eruptiva.

Sistema volcánico	n.º	Fechas (Día/Mes/Año)		Características principales de la actividad eruptiva									VEI	
		Inicio	Término	RS	SV	EX	CG	EP	FL	LH	AR	DR		AC (metros)
Planchón-Peteroa	1	07/11/2018	7±1/05/2019	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	2
	2	17/02/2011	26±1/06/2011	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	3
	3	06/09/2010	13/10/2010	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	2
	4	18/11/1998	21/11/1998	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	1
	5	09/02/1991	2±2/03/1991	X	X	X	X	X	?	?	?	?	< 1.000	1
	6	16±15/02/1967	?	-	-	X	X	?	-	-	-	-	< 1.000	1
	7	16±15/01/1962	?/01/1963	-	-	X	X	?	-	-	-	-	< 1.000	1
	8	10/07/1960	?/07/1961	?	?	X	X	X	-	-	-	-	> 2.000	2
	9	06-11-1959	1959	-	-	X	X	X	-	-	-	-	< 1.000	1

10	1955	1956	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	?	2
11	?/01/1937	?/12/1939	-	-	X	X	X	-	-	-	-	-	< 1.000	1
12	1912	?	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	?	2
13	1889	?/02/1896	-	-	X	X	X	-	-	-	-	-	> 1.000	2
14	1878	1879	-	-	X	X	X	-	-	-	-	-	< 1.000	1
15	1872	?	-	-	X	X	X	-	-	-	-	-	?	2
16	1869	?	-	-	X	X	X	-	-	-	-	-	?	2
17	1860	?	-	-	X	X	X	-	-	-	-	-	< 1.000	1
18	1842	?	-	-	X	X	X	-	-	-	-	-	?	2
19	?/02/1837	?	-	-	X	X	X	X	X	X	X	X	> 1.000	2
20	1835	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	2
21	03/12/1762	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	4
22	1750	1751	-	-	X	X	X	-	-	-	-	-	> 2.000	2
23	1660	?	-	-	X	X	X	-	-	-	-	-	?	3

Tabla 30. Erupciones históricas del complejo volcánico Cerro Azul-Quizapu. En amarillo se destacan las consideradas para esta evaluación. RS: Ruidos subterráneos. SV: Sismos volcánicos. EX: Explosiones. CG: Columna de gases y ceniza. EP: Eyección de piroclastos. FL: Flujo de lava. LH: Lahares. AR: Aumento del caudal de los ríos. DR: Derrumbes. AC: Altura de la columna eruptiva.

Sistema volcánico	n.º	Fechas (Día/Mes/Año)		Características principales de la actividad eruptiva									VEI	
		Inicio	Término	RS	SV	EX	CG	EP	FL	LH	AR	DR		AC (metros)
Cerro Azul-Quizapu	1	09/08/1967	?	-	-	X	X	?	-	-	-	-	< 1.000	1
	2	15±5/04/1949	?	-	-	X	X	X	-	-	-	-	1.000	1
	3	30/04/1932	22/07/1935	X	X	X	X	X	X	-	-	-	> 3.000	2
	4	09/04/1932	15/04/1932	X	X	X	X	X	-	-	-	X	30.000	5-6
	5	1931	?	-	-	X	-	-	-	-	-	-	< 1.000	1
	6	03/08/1926	?/08/1929	X	?	X	X	X	X	-	-	-	4.000	2
	7	1921	1923	-	-	X	X	X	-	-	-	-	?	2
	8	20-11-1920	?	-	-	X	-	-	-	-	-	-	?	2
	9	25-02-1916	?	-	-	X	-	-	-	-	-	-	?	2
	10	08-09-1914	?/01/1915	X	X	X	X	X	?	-	-	-	7.000	3
	11	?/02/1912	26-02-1913	-	-	X	X	X	-	-	-	-	10.500	3
	12	1911	?	-	-	X	-	-	-	-	-	-	?	2

13	10/08/1906	28/06/1907	x	x	x	x	x	x	?	-	-	-	> 2.000	2
14	01/01/1903	03/01/1903	x	x	x	x	x	x	-	-	-	-	> 1.000	1-2
15	1902	?	-	-	x	x	x	-	-	-	-	-	> 1.000	1-2
16	1897	?	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	1.000	1
17	?/02/1875	?	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	1.000	1
18	?/01/1873	?	-	-	x	x	x	-	-	-	-	-	1.000	1
19	06/05/1871	1871	-	-	x	x	x	-	-	-	-	-	> 3.000	2
20	1857	?	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	?	2
21	1852	?	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	?	2
22	26/11/1846	03/02/1848	x	x	x	x	x	x	x	-	-	x	> 3.000	2

Tabla 31. Erupciones históricas del complejo volcánico Quetrupillán. En amarillo se destacan las consideradas para esta evaluación. RS: Ruidos subterráneos. SV: Sismos volcánicos. EX: Explosiones. CG: Columna de gases y ceniza. EP: Eyección de piroclastos. FL: Flujo de lava. LH: Lahares. AR: Aumento del caudal de los ríos. DR: Derrumbes. AC: Altura de la columna eruptiva.

Sistema volcánico		Fechas (Día/Mes/Año)		Características principales de la actividad eruptiva									VEI	
	n.º	Inicio	Término	RS	SV	EX	CG	EP	FL	LH	AR	DR	AC (metros)	
Quetrupillán	1	1892	?	-	-	x	-	-	-	-	-	-	?	-
	2	06/06/1872	27/07/1872	-	-	x	x	x	-	-	-	-	> 5.000	3
	3	?/11/1852	1853	-	-	x	x	-	-	-	-	-	?	-
	4	22/11/1822	1822	-	-	-	-	-	-	-	-	-	?	-

Tabla 32. Erupciones históricas del volcán Osorno. En amarillo se destacan las consideradas para esta evaluación. RS: Ruidos subterráneos. SV: Sismos volcánicos. EX: Explosiones. CG: Columna de gases y ceniza. EP: Eyección de piroclastos. FL: Flujo de lava. LH: Lahares. AR: Aumento del caudal de los ríos. DR: Derrumbes. AC: Altura de la columna eruptiva.

Sistema volcánico		Fechas (Día/Mes/Año)		Características principales de la actividad eruptiva									VEI	
	n.º	Inicio	Término	RS	SV	EX	CG	EP	FL	LH	AR	DR	AC (metros)	
Osorno	1	1869	?	-	-	x	x	x	-	-	-	-	1.000	1
	2	?/06/1855	?	-	-	x	x	x	-	-	-	-	?	1-2
	3	?/11/1852	?	-	-	x	-	-	-	-	-	-	?	1-2

	4	1836	07/11/1837	x	x	x	x	x	x	x	x	?	> 3.000	2-3
	5	19/01/1835	05/12/1835	x	x	x	x	x	x	x	-	?	> 3.000	2-3
	6	26/11/1834	29/11/1834	-	-	x	x	x	-	-	-	-	> 1.000	2
	7	1796	?	-	-	x	x	x	-	-	-	-	1.000	1
	8	?/11/1792	1793	-	-	x	x	x	?	-	-	-	1.000	1
	9	09/03/1790	?/12/1791	-	-	x	x	x	x	-	-	-	> 2.000	2
	10	18/01/1778	1779	-	-	x	x	x	-	-	-	-	1.000	1
	11	1765	?	-	-	x	x	x	-	-	-	-	1.000	1
	12	1759	?	-	-	x	x	x	-	-	-	-	< 1.000	1
	13	1752	?	-	-	x	x	x	-	-	-	-	?	1
	14	1719	?	-	-	x	x	x	-	-	-	-	1.000	1
	15	1644	?	-	-	x	x	x	-	-	-	-	1.000	1
	16	?/02/1640	?	-	-	x	x	x	-	-	-	-	1.000	1
	17	1575	?	-	-	x	x	x	-	-	-	-	1.000	1

Tabla 33. Erupciones históricas del volcán Calbuco. En amarillo se destacan las consideradas para esta evaluación. RS: Ruidos subterráneos. SV: Sismos volcánicos. EX: Explosiones. CG: Columna de gases y ceniza. EP: Eyección de piroclastos. FL: Flujo de lava. LH: Lahares. AR: Aumento del caudal de los ríos. DR: Derrumbes. AC: Altura de la columna eruptiva.

Sistema volcánico	n.º	Fechas (Día/Mes/Año)		Características principales de la actividad eruptiva									AC (metros)	VEI	
		Inicio	Término	RS	SV	EX	CG	EP	FL	LH	AR	DR			
Calbuco	1	22-04-2015	26/05/2011	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	4
	2	26-08-1972	?/08/1972	x	x	x	x	x	-	-	-	-	> 1.000	1	
	3	25-01-1961	15-03-1961	x	x	x	x	x	x	x	-	-	12.000	3-4	
	4	19-02-1945	?/03/1945	-	-	x	x	x	-	-	-	-	> 1.000	2	
	5	?/12/1932	05/01/1933	-	-	x	x	x	-	-	-	-	> 2.000	2	
	6	06-01-1929	09/01/1929	x	x	x	x	x	x	x	-	x	> 9.000	3-4	
	7	1922	?	-	-	x	-	-	-	-	-	-	?	1	
	8	13-04-1917	?/05/1917	x	x	x	x	x	x	-	-	-	> 7.000	3	
	9	?/11/1911	?/01/1912	-	-	x	x	x	-	-	-	-	1.000	1-2	
	10	?/03/1909	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	2	
	11	1906	22-04-1907	-	-	x	x	x	-	-	-	-	< 1.000	1	
	12	1903	?	-	-	x	x	x	-	-	-	-	< 1.000	1	

	13	03/02/1893	20/12/1895	x	x	x	x	x	x	x	x	x	12.000	3-4
	14	?/11/1837	1838	-	-	x	x	x	-	-	-	-	< 1.000	1
	15	26/11/1834	1834	-	-	x	x	-	-	-	-	-	< 1.000	1

Tabla 34. Erupciones históricas del volcán Chaitén. En amarillo se destacan las consideradas para esta evaluación. RS: Ruidos subterráneos. SV: Sismos volcánicos. EX: Explosiones. CG: Columna de gases y ceniza. EP: Eyección de piroclastos. FL: Flujo de lava. LH: Lahares. AR: Aumento del caudal de los ríos. DR: Derrumbes. AC: Altura de la columna eruptiva.

Sistema volcánico		Fechas (Día/Mes/Año)		Características principales de la actividad eruptiva									VEI	
	n.º	Inicio	Término	RS	SV	EX	CG	EP	FL	LH	AR	DR	AC (metros)	
Chaitén	1	02-05-2008	31±3/05/2011	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	4
	2	1870	1870	-	-	x	x	x	-	-	-	-	> 2.000	2
	3	1834	1835	-	-	x	x	x	?	-	-	-	?	?
	4	1766	?	-	-	x	x	x	-	-	-	-	?	?
	5	1742	?	-	-	x	x	x	-	-	-	-	?	?
	6	1640 ± 18	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?

Tabla 35. Erupciones históricas del volcán Hudson. En amarillo se destacan las consideradas para esta evaluación. RS: Ruidos subterráneos. SV: Sismos volcánicos. EX: Explosiones. CG: Columna de gases y ceniza. EP: Eyección de piroclastos. FL: Flujo de lava. LH: Lahares. AR: Aumento del caudal de los ríos. DR: Derrumbes. AC: Altura de la columna eruptiva.

Sistema volcánico		Fechas (Día/Mes/Año)		Características principales de la actividad eruptiva									VEI	
	n.º	Inicio	Término	RS	SV	EX	CG	EP	FL	LH	AR	DR	AC (metros)	
Hudson	1	26-10-2011	01/11/2011	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	2
	2	08-08-1991	15/08/1991	x	x	x	x	x	x	x	x	-	18.000	4
	3	05-04-1973	14/04/1973	x	x	x	x	x	x	x	-	-	> 2.600	2
	4	12-08-1971	18/09/1971	x	x	x	x	x	-	x	x	-	5 a 12.000	3-4
	5	1969	1970	-	-	x	x	x	x	x	x	-	?	2
	6	1891	?	-	-	x	-	-	-	-	-	-	?	2