



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
DEPARTAMENTO CIENCIAS DE LA TIERRA



**EVALUACIÓN Y COMUNICACIÓN DEL PELIGRO Y
AMENAZA DEL VOLCÁN VILLARRICA MEDIANTE EL USO
DE ÁRBOLES PROBABILÍSTICOS, ANÁLISIS DE
EXPOSICIÓN Y CONFECCIÓN DE MAPA DE PELIGRO
SIMPLIFICADO, REGIONES DE LA ARAUCANÍA Y LOS RÍOS,
CHILE**

Memoria para optar al Título de Geólogo

Alfredo Antonio Rivas Vergara

Profesor Patrocinante : Dr. José Luis Palma Lizana

Profesores Comisión : Dr. Óscar Enrique Figueroa Arriagada
Dr. Jorge Andrés Quezada Flory

CONCEPCIÓN, 2019

*«Volgi, Beatrice, volgi li occhi santi»,
era la sua canzone, «al tuo fedele
che, per vederti, ha mossi passi tanti!*

*Per grazia fa noi grazia che disvele
a lui la bocca tua, sì che discerna
la seconda bellezza che tu cele».*

*O isplendor di viva luce eterna,
chi palido si fece sotto l'ombra
sì di Parnaso, o bevve in sua cisterna,
che non paresse aver la mente ingombra,
tentando a render te qual tu paresti
là dove armonizzando il ciel t'adombra,
quando ne l'aere aperto ti solvesti?*



Dante Alighieri

ÍNDICE

	Página
RESUMEN	
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Ubicación y Accesos	6
1.3. Objetivos	7
1.3.1. Objetivo General	7
1.3.2. Objetivos Específicos	8
1.4. Metodología de Trabajo	8
1.5. Agradecimientos	10
2. MARCO TEÓRICO	11
2.1. Conceptos Generales	11
2.2. Peligros Volcánicos	14
2.2.1. Caída de Tefra	16
2.2.2. Proyectiles Balísticos	19
2.2.3. Flujos y Oleadas Piroclásticas	20
2.2.4. Lahares	22
2.2.5. Flujos de Lava	24
2.3. Árboles Probabilísticos	26
2.3.1. Estructuración	27
2.3.2. Tratamiento Probabilístico	28
2.3.3. Aplicaciones de Árboles Probabilísticos	30
2.4. Comunicación de los Peligros Volcánicos	32
2.4.1. Diseño de los Mapas de Peligro	33
2.4.1.1. Unidades de Percepción.....	34
2.4.1.2. Proyección de los Mapas.....	37
2.4.1.3. Color y Esquemas de Color.....	39
2.4.1.4. Simbología.....	41
2.4.2. Características Intrínsecas de los Usuarios	41

2.5. Estudio de la Usabilidad.....	44
2.5.1. Diseño Experimental.....	45
2.5.2. Análisis de los Datos de Seguimiento Ocular.....	47
2.5.2.1. Clasificación de los Datos.....	47
2.5.2.2. Registro de los Datos de Seguimiento Ocular.....	47
2.5.2.3. Interpretación de los Datos.....	49
3. MARCO GEOLÓGICO Y VOLCANOLÓGICO.....	51
3.1. Rocas del Basamento.....	53
3.1.1. Rocas Estratificadas.....	53
3.1.1.1. Complejo Metamórfico Trafún.....	53
3.1.1.2. Formación Panguipulli.....	53
3.1.1.3. Estratos de Pino Huacho.....	54
3.1.1.4. Estratos de Península Pucón.....	54
3.1.1.5. Estratos de Huincacara.....	55
3.1.2. Rocas Intrusivas.....	55
3.1.2.1. Intrusivos del Paleozoico.....	55
3.1.2.2. Intrusivos del Cretácico.....	55
3.1.2.3. Intrusivos del Mioceno.....	56
3.2. Rocas y Depósitos Volcánicos.....	56
3.2.1. Unidad Villarrica 1.....	56
3.2.2. Unidad Villarrica 2.....	57
3.2.3. Unidad Villarrica 3.....	58
3.2.4. Centros Volcánicos Adventicios.....	59
3.2.4.1. Grupo Los Nevados.....	59
3.2.4.2. Grupo Chaillupén.....	60
3.3. Marco Tectónico.....	60
4. ÁRBOL PROBABILÍSTICO DEL VOLCÁN VILLARRICA.....	62
4.1. Nodos del Árbol Probabilístico.....	62
4.1.1. Condición Inicial.....	63
4.1.2. Nodo de Fenómeno Volcánico.....	63

4.1.3. Nodo de Sector.....	63
4.1.4. Nodo de Impacto.....	66
4.1.4.1. Nodo de Impacto Proximal.....	67
4.1.4.2. Nodo de Impacto Medio.....	69
4.1.4.3. Nodo de Impacto Distal.....	70
4.2. Actividad Eruptiva Histórica del Volcán Villarrica.....	71
4.3. Confección del Árbol Probabilístico.....	77
4.3.1. Cálculo de Probabilidades.....	77
4.4. Resultados.....	81
4.5. Discusiones.....	85
4.5.1. Recolección y Selección de la Actividad Eruptiva.....	86
4.5.2. Metodología de la Confección del Árbol Probabilístico.....	86
4.5.3. Procesamiento de los datos del Árbol Probabilístico.....	87
4.5.4. Pronóstico de Lahares en Temporada Seca o Húmeda.....	88
4.5.5. Resultados y Utilización del Árbol Probabilístico.....	89
4.6. Conclusiones.....	92
5. AMENAZA DEL VOLCÁN VILLARRICA.....	94
5.1. Estructuración.....	94
5.1.1. Definición del Problema.....	94
5.1.2. Objetivos y Utilización.....	95
5.1.3. Peligros que Considerar.....	95
5.1.4. Escenarios Eruptivos y Escala de Tiempo.....	95
5.1.5. Escala y Resolución Espacial.....	96
5.1.6. Elementos Vulnerables.....	96
5.1.7. Metodología.....	96
5.1.8. Formato de los Resultados.....	97
5.1.9. Limitaciones e Incertidumbres.....	97
5.1.10. Indicaciones y Ejemplos para la Utilización de Resultados.....	98
5.2. Peligro del Volcán Villarrica.....	99
5.2.1. Definición de los Escenarios de Peligro Volcánico.....	99
5.2.2. Integración de los Peligros Volcánicos.....	105

5.3. Exposición del Volcán Villarrica.....	108
5.3.1. Población e Infraestructura y Sitios Críticos Aledaños al Volcán.....	108
5.3.1.1. Población Permanente.....	108
5.3.1.2. Población Flotante.....	111
5.3.1.3. Infraestructura y Sitios Críticos de Servicio y Turismo.....	114
5.3.1.4. Rutas.....	117
5.3.1.5. Vías de Evacuación y Puntos de Encuentro.....	118
5.3.2. Cuantificación de la Exposición.....	120
5.3.3. Resultados de la Evaluación de Exposición.....	123
5.4. Resultados de la Evaluación de Amenaza del Volcán Villarrica...	127
5.5. Discusiones	130
5.5.1. Análisis de Peligro Volcánico.....	131
5.5.2. Análisis de Exposición.....	132
5.5.3. Análisis de Amenaza Volcánica.....	135
5.5.4. Análisis de Riesgo Volcánico.....	137
5.6. Conclusiones.....	139
5.6.1. Análisis de Exposición.....	139
5.6.2. Análisis de Amenaza.....	140
6. PELIGRO SIMPLIFICADO DEL VOLCÁN VILLARRICA.....	144
6.1. Estructuración.....	144
6.1.1. Definición del Problema.....	144
6.1.2. Objetivos y Utilización.....	146
6.1.3. Peligros que Considerar.....	147
6.1.4. Escenarios Eruptivos y Escala de Tiempo.....	147
6.1.5. Escala y Resolución Espacial.....	148
6.1.6. Elementos Vulnerables.....	148
6.1.7. Metodología.....	148
6.1.8. Formato de los Resultados.....	149
6.1.9. Limitaciones e Incertidumbres.....	150
6.1.10. Indicaciones y Ejemplos para la Utilización de Resultados.....	150
6.2. Diseño de Mapa Orientado a la Atención.....	151

6.2.1. Capa de Base.....	153
6.2.2. Capa de Peligros Volcánicos.....	156
6.2.3. Capa de Localización.....	160
6.2.4. Capa de Emergencia.....	164
6.2.5. Leyenda e Informaciones.....	165
6.3. Estudio de Usabilidad.....	168
6.3.1. Hipótesis.....	168
6.3.2. Diseño Experimental.....	168
6.3.2.1. Variables Independientes.....	168
6.3.2.2. Variables Dependientes.....	172
6.3.2.3. Enfoque del Estudio.....	174
6.3.3. Participantes.....	174
6.3.4. Materiales.....	175
6.3.5. Procedimiento.....	175
6.4. Resultados.....	177
6.4.1. Consideraciones Previas.....	177
6.4.2. Resultados del Análisis de Percepción de Riesgo.....	179
6.4.3. Resultados del Análisis del Estudio de Usabilidad.....	181
6.4.3.1. Satisfacción del Usuario.....	181
6.4.3.2. Duración Promedio de Fijaciones.....	183
6.4.3.3. Proporción de Tiempo.....	185
6.4.3.4. Número de Fijaciones.....	187
6.4.3.5. Promedio de la Longitud de las Sacadas.....	189
6.4.3.6. Mapa de Atención Visual.....	190
6.5. Discusiones.....	193
6.5.1. Comunicación de Peligros Volcánicos.....	193
6.5.2. Estudio de Usabilidad.....	196
6.5.3. Interpretación de la Percepción de Riesgo.....	198
6.5.4. Satisfacción del Usuario.....	198
6.5.5. Complejidad y Relevancia.....	199
6.5.6. Atención Visual.....	201
6.6. Conclusiones.....	204

7. DISCUSIONES	206
7.1. Aplicación de un Caso Hipotético	206
7.2. Inferencias del Caso Hipotético	210
7.3. Propuestas y Consideraciones Finales	212
8. CONCLUSIONES	216
9. REFERENCIAS	219
ANEXOS	227

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. 1. Mapa de ubicación y accesos del volcán Villarrica.....	7
2. 1. Peligros de balísticos e implementación de procesos y productos de comunicación.....	13
2. 2. Energía de impacto de los proyectiles balísticos.....	20
2. 3. Esquema de un árbol de eventos del Monte Vesubio.....	28
2. 4. Mapas de contorno, modelo de elevación digital y fotografía aérea.....	35
2. 5. Mapas de puntos discretos y coroplético.....	36
2. 6. Diversos mapas que representan tiempos de llegada de lahares.....	37
2. 7. Diversos diseños de mapas de peligro de caída de ceniza volcánica.....	37
2. 8. Mapa 2D sombreado con tinte hipsométrico y mapa 3D con ortofoto.....	39
2. 9. Diversos coloreados en mapas de peligro de caída de ceniza volcánica.....	40
2. 10. Mapa de presión y temperatura con diferentes saliencias visuales.....	42
2. 11. Gráfica de posición contra el tiempo de las señales del movimiento ocular.....	48
3. 1. Mapa geológico del volcán Villarrica.....	51
4. 1. Mapa de nodo de sector del volcán Villarrica.....	64
4. 2. Mapa de nodo de impacto del volcán Villarrica.....	66
4. 3. Mapa de trazado de la zona de impacto proximal.....	68
4. 4. Mapa de trazado de la zona de impacto medio.....	69
4. 5. Mapa de trazado de la zona de impacto distal.....	71

4.	6.	Árbol probabilístico de lahares del volcán Villarrica.....	81
4.	7.	Árbol prob. de flujos de lava del volcán Villarrica.....	82
4.	8.	Árbol prob. de proy. balísticos del volcán Villarrica.....	82
4.	9.	Árbol prob. de flujos piroclásticos del volcán Villarrica.....	83
4.	10.	Árbol probabilístico de caída de tefra del volcán Villarrica.....	83
4.	11.	Árbol probabilístico de temporada seca para lahares del volcán Villarrica.....	88
4.	12.	Árbol probabilístico de temporada húmeda para lahares del volcán Villarrica.....	89
4.	13.	Diagramas de rosa con estadística de vientos para alturas de 5, 10, 15, 20 y 25 km para volcán Villarrica.....	92
5.	1.	Zonas de flujos de lava del volcán Villarrica.....	99
5.	2.	Distribución de zonas de corrientes de densidad piroclástica en el volcán Villarrica.....	100
5.	3.	Zonación del peligro volcánico de lahares en el volcán Villarrica.....	100
5.	4.	Mapa de peligro para caída de proyectiles balísticos del volcán Villarrica.....	101
5.	5.	Mapa probabilístico de caída de tefra para el volcán Villarrica.....	101
5.	6.	Mapa de peligros integrados del volcán Villarrica.....	107
5.	7.	Gráfico de habitantes y viviendas de las comunas de Pucón, Villarrica, Curarrehue y Panguipulli.....	109
5.	8.	Mapa de manzanas y entidades censales 2017.....	110
5.	9.	Mapa de infraestructura de edificios aledaños al volcán Villarrica.....	111
5.	10.	Gráfico de la llegada de turistas en las comunas de Pucón, Villarrica y Panguipulli.....	112
5.	11.	Mapa de distribución de los establecimientos de alojamiento turístico.....	114
5.	12.	Mapa de infraestructura crítica de servicio.....	115
5.	13.	Mapa de infraestructura crítica de turismo.....	116
5.	14.	Mapa de infraestructura crítica de rutas.....	117
5.	15.	Mapa de vías de evacuación y puntos de encuentro.....	118
5.	16.	Mapa del grado de exposición máxima de los sectores aledaños al volcán Villarrica.....	123
5.	17.	Gráfico de exposición máxima y mínima de Pucón.....	124
5.	18.	Gráfico de exposición máxima y mínima de Villarrica.....	125
5.	19.	Gráfico de exposición máxima y mínima de Licán Ray.....	125
5.	20.	Gráfico de exposición máxima y mínima de Coñaripe.....	126

5.	21.	Gráfico de exposición máxima y mínima sector El Volcán.....	126
5.	22.	Mapa de amenaza máxima del volcán Villarrica.....	128
5.	23.	Mapa de amenaza máxima promedio por entidad del volcán Villarrica.....	129
5.	24.	Gráfico de amenaza promedio por comuna.....	130
5.	25.	Gráfico de amenaza de Pucón.....	137
6.	1.	Mapa de peligro del volcán Villarrica SERNAGEOMIN.....	145
6.	2.	Imagen satelital de la entrada del Parque Nacional Villarrica sector Rucapillán.....	153
6.	3.	Mapa de lagos y ríos aledaños al volcán Villarrica.....	155
6.	4.	Mapa de peligro simplificado preliminar del volcán Villarrica.....	158
6.	5.	Mapa de rutas destacadas aledañas al volcán Villarrica.....	161
6.	6.	Mapa de puentes aledaños al volcán Villarrica.....	162
6.	7.	Simbología para sitios conocidos.....	163
6.	8.	Simbología para puntos de encuentro y vías de evacuación.....	165
6.	9.	Diseño de la leyenda del mapa de peligro simplificado del volcán Villarrica....	166
6.	10.	Diseño del cuadro de informaciones del mapa de peligro simplificado del volcán Villarrica.....	167
6.	11.	Mapa simplificado de peligro volcánico de la entrada al Parque Nacional Villarrica sector Rucapillán.....	169
6.	12.	Extracción del mapa de peligro del SERNAGEOMIN entrada al Parque Nacional Villarrica sector Rucapillán.....	170
6.	13.	Diagrama de satisfacción según matriz 2 x 2.....	182
6.	14.	Diagrama de satisfacción según diseño.....	183
6.	15.	Diagrama de duración promedio de fijaciones según matriz 2 x 2.....	184
6.	16.	Diagrama de duración promedio de fijaciones según diseño.....	184
6.	17.	Diagrama de proporción de tiempo según matriz 2 x 2.....	186
6.	18.	Diagrama de proporción de tiempo según diseño.....	186
6.	19.	Diagrama de número de fijaciones según matriz 2 x 2.....	187
6.	20.	Diagrama de número de fijaciones según diseño.....	188
6.	21.	Diagramas de promedio de longitud de sacadas según matriz 2 x 2 y diseño...	189
6.	22.	Comparación de mapas de total de fijaciones del diseño propio por percepción de riesgo.....	190
6.	23.	Comparación de mapas de primera y segunda fijación del diseño propio por percepción de riesgo.....	191

6.	24.	Comparación de mapas de total de fijaciones del diseño del SERNAGEOMIN por percepción de riesgo.....	191
6.	25.	Comparación de mapas de primera y segunda fijación del diseño del SERNAGEOMIN por percepción de riesgo.....	192
6.	26.	Comparación de mapas de total de fijaciones del diseño propio con el del SERNAGEOMIN.....	192
6.	27.	Comparación de mapas de primera y segunda fijación del diseño propio con el del SERNAGEOMIN.....	193
7.	1.	Mapa de la suma de exposición máxima por entidad de la comuna de Pucón....	208
7.	2.	Extracción modificada del mapa de amenaza máxima del caso Escuela Básica Candelaria.....	210
7.	3.	Mapa de amenaza máxima promedio por localidad.....	212
7.	4.	Mapa de amenaza máxima promedio por nodo del árbol probabilístico.....	213
7.	5.	Mapa de suma de exposición máxima por nodo del árbol probabilístico.....	214

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía	Página
6. 1. Materiales para la aplicación del experimento.....	175
6. 2. Aplicación del estudio de seguimiento ocular en terreno.....	176

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. 1. Resultados globales según elemento de sistema de evacuación.....	2
2. 1. Principales tipos de peligros volcánicos.....	15
2. 2. Impactos de la ceniza volcánica sobre la sociedad.....	17
3. 1. Leyenda del mapa geológico del volcán Villarrica.....	52
4. 1. Actividad eruptiva histórica del volcán Villarrica.....	74
4. 2. Lahares históricos del volcán Villarrica.....	75
4. 3. Antecedentes de dimensiones y alcance de distintas coladas de lava en el volcán Villarrica.....	76
4. 4. Resultado de la inferencia bayesiana para el árbol probabilístico del volcán Villarrica.....	78
4. 5. Resultado de las probabilidades condicionales de la caída de tefra.....	80

5.	1.	Escenarios de peligro del volcán Villarrica establecidos para el modelo de peligro.....	102
5.	2.	Integración de peligros del volcán Villarrica.....	106
5.	3.	Llegadas de turistas total de las comunas de Pucón, Villarrica y Panguipulli...	113
5.	4.	Resumen de las variables de exposición.....	121
5.	5.	Compendio de los resultados del censo 2017.....	138
6.	1.	Capas visuales para un diseño orientado a la atención.....	151
6.	2.	Definición de zonas de peligro volcánico simplificado.....	159
6.	3.	Matriz de variables independientes del estudio de usabilidad.....	169
6.	4.	Preguntas del cuestionario de percepción de riesgo.....	170
6.	5.	Preguntas del cuestionario de satisfacción.....	172
6.	6.	Percepción de riesgo de los sujetos de estudio por eje temático.....	179
6.	7.	Objetos centroides de la percepción de riesgo.....	181



RESUMEN

El Villarrica ($-39^{\circ},25'$, $-71^{\circ},56'$) es el volcán más activo de Chile y un foco de atracción para turistas de todo el mundo. Tanto por su registro histórico, con al menos 59 eventos, como por el conocimiento de las consecuencias fatales que se han presentado en el pasado y que se pronostican pueden suceder en el futuro; se elaboran herramientas de evaluación y comunicación de peligro y amenaza volcánica, y se exploran las variables de incertidumbre asociadas. Esto a través de la confección de árboles probabilísticos, mapas, tablas y gráficas de exposición y amenaza, y la confección de un mapa simplificado con su *usabilidad* probada empíricamente. Todos estos elementos han sido elaborados para su utilización por parte de usuarios no especializados, tales como funcionarios de planificación y gestión de emergencias, así como la comunidad. El árbol probabilístico del volcán Villarrica se elabora estableciendo la actividad histórica del volcán utilizando información bibliográfica y calculando sus probabilidades de ocurrencia con base en la inferencia bayesiana tanto de los fenómenos, la orientación, como del alcance de los impactos. Los fenómenos volcánicos considerados y su probabilidad de ocurrencia (una vez comenzada la erupción) son: lahares (63%), flujos de lava (37%), caída de tefra (97%), proyectiles balísticos (84%) y flujos piroclásticos (5%). Además, los nodos de sector e impacto se construyen en base a una región geográfica para facilitar su integración con otros mapas. Por otra parte, la cuantificación de la amenaza se realiza con base a evaluaciones de peligro existentes, integrándolas a la evaluación de exposición elaborada con información geográfica de alta resolución, lo que permite su utilización en problemáticas globales (deducir un punto de importancia para gestionar una tarea), como particulares (evaluación de vías de evacuación). La metodología permite que este análisis de amenaza pueda ser replicado en otro tipo de evaluaciones de peligro, amenaza o riesgo, y en otros volcanes. El mapa simplificado ha sido confección con un diseño orientado a la atención, el cual su usabilidad ha sido probada empíricamente a través de un experimento de seguimiento ocular con enfoque *bottom-up* y un cuestionarios de percepción de riesgo y satisfacción. El estudio fue aplicado a visitantes en la entrada del Parque Nacional Villarrica, sector Rucapillán. Del estudio se concluye que el mapa simplificado es apto para usuarios en todos los niveles de audiencia, puesto que los parámetros de seguimiento ocular revelan que el mapa simplificado presenta una menor complejidad en su contenido que en su leyenda y cuadro de informaciones y, además, menor complejidad que el mapa de peligro del SERNAGEOMIN. Por otra parte, el cuadro de informaciones y leyenda es menos relevante que en el del mapa de peligro del SERNAGEOMIN; aunque estas características se hacen presente cuando el usuario presenta una baja percepción de riesgo, es decir, presenta pocos conocimientos prácticos y experiencias relacionadas a volcanes y seguridad, y nulas conductas de prevención. Sin embargo, también se observa que, en los usuarios con alta percepción de riesgo, el mapa simplificado presenta una mayor relevancia en su contenido que en el mapa de peligro del SERNAGEOMIN. Además, de los análisis de atención visual se concluye que los elementos más relevantes son los íconos de localización y las vías de evacuación, por lo que coincide con la intención comunicativa del diseño. Finalmente, del estudio de usabilidad, se concluye también que los usuarios con bajo nivel de percepción afirman que el mapa simplificado es más fácil de entender, lo encuentran más útil y lo recomendarían a sus familiares. Para poner a prueba el uso e integración de todos los productos, se plantea una situación hipotética, resultando que éstos se integran sinérgicamente y cumplen un rol único en la resolución del problema. De esta prueba también resulta la mejora de algunos productos, así como en la elaboración de productos integrados entre la evaluación de amenaza (y exposición) y el árbol probabilístico.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El volcán Villarrica fue y se mantiene clasificado como el número uno en el ranking de riesgo específico de Chile, presentando un muy alto riesgo. El ranking es elaborado por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) con base en el *National Volcano Early Warning System* (NVEWS) elaborado por el *United States Geological Survey* (USGS), el cual integra factores de peligro intrínsecos de cada centro volcánico y factores de exposición asociado a éstos (Lara *et al.*, 2006). Este nivel en el ranking es apreciable, porque el volcán Villarrica presenta una cantidad considerable de eventos eruptivos, siendo registrados al menos 59 erupciones históricas desde 1558 (Petit-Breuilh, 1994; Dzierma & Wehrmann, 2010) sin considerar las actividades y erupciones más recientes registradas por los sistemas de monitoreo volcánico actuales: desde 1994 por el Proyecto Observación Volcán Villarrica (POVI) y desde 2009 por el Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur (OVDAS). Los fenómenos volcánicos que se han registrado como parte de los eventos históricos del Villarrica son, principalmente, coladas de lava, flujos laháricos y piroclastos de caída; además puede haber la ocurrencia de emisiones de gases tóxicos, sismicidad, avalanchas de nieve, deslizamientos, contaminación de aguas, suelos y vegetación; y la inusual ocurrencia de flujos piroclásticos (Moreno & Clavero, 2006). El alto nivel en el ranking es debido también a que en los sectores aledaños al volcán están ubicadas algunas ciudades y balnearios como Villarrica, Pucón, Licán Ray, Coñaripe, entre otras localidades menores, las cuales presentan una población de 82.635 habitantes alrededor del volcán según el censo 2017 elaborado por el Instituto Nacional de Estadísticas (INE). Además, estas localidades presentan un alto flujo de turistas, siendo registrados 219.516 llegadas y 578.215 pernотaciones de pasajeros el 2017 en establecimientos de alojamiento turístico según informes del Servicio Nacional de Turismo (SERNATUR). Por otra parte, en los sectores aledaños al volcán hay una considerable cantidad de infraestructura crítica, tanto de edificios habitados, como de rutas recurrentes. La infraestructura y población aledañas han sido afectadas por fenómenos del volcán Villarrica en el pasado, teniendo consecuencias dañinas como los frecuentes cortes de rutas por el paso destructivo de lahares como, por ejemplo, la Ruta 199 (Monseñor Francisco Valdés Subercaseaux), entre la localidad de Molco y río Turbio, o la Ruta S-95-T (camino a Licán Ray), entre el sector de Voipir y Coñaripe (Moreno & Clavero, 2006). Otros antecedentes son la erupción

de 1963-64 que destruyó parte del pueblo de Coñaripe, caseríos rurales y campos de cultivo, provocando 22 muertos; también la erupción de 1971 que arrasó nuevamente la localidad de Coñaripe provocando 17 muertos (Petit-Breuilh, 1994); y la erupción de 1948-49 que arrasó bosques, viviendas y construcciones a lo largo de los cauces, se perdieron centenares de animales y se registraron 23 muertos y 31 desaparecidos (Casertano, 1964).

Más recientemente, la última erupción del volcán Villarrica ocurrió en la madrugada del 03 de marzo de 2015 donde fueron evacuados un total de 5.385 personas. A pesar de que no se informan víctimas fatales ni daños en infraestructura en las zonas más pobladas (con excepción de puentes entre la confluencia de los ríos Turbio y Pedregoso), sí se informan daños en la zona más cercana al volcán, como algunas viviendas y dependencias del centro de esquí y de la Corporación Nacional Forestal (CONAF) causado por flujos laháricos (Bertin *et al.*, 2015). Durante y posterior a esa madrugada hubo confusión, desinformación, rumores que incitaban al miedo y desconfianza hacia las autoridades expresada por grupos de personas en redes sociales, lo cual podría haber afectado negativamente a la población en un escenario eruptivo más catastrófico.

En el último simulacro realizado en las comunas de Pucón, Villarrica y Panguipulli el 19 de octubre de 2017 a las 10:00 a.m. se estiman 10.827 evacuados en total y se registra un tiempo de evacuación promedio entre 9 y 10 minutos según el Informe Técnico de Evaluación de Simulacro de Erupción de Volcán Villarrica elaborado por la Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior (ONEMI). La aprobación del simulacro fue entre regular y bueno para cada elemento (Tabla 1.1).

Tabla 1.1: Resultados globales según elemento de sistema de evacuación. Obtenido del Informe Técnico de Evaluación de Simulacro de Erupción del Volcán Villarrica elaborado por la ONEMI. El porcentaje de aprobación es categorizado en deficiente 0-39%, regular 40-69%, bueno 70-89% y excelente 90-100%.

Elementos Sistema Evacuación Evaluados	La Araucanía	Los Ríos
Punto de Encuentro	59%	59%
Vías de Evacuación	56%	73%
Establecimientos Educativos	75%	68%
Puntos Estratégicos	66%	No Aplica

Algunas de las deficiencias identificadas del informe son: (1) la ausencia de señalética de evacuación. (2) Las insuficientes medidas de inclusividad para personas en situación de discapacidad y para adultos mayores y, a su vez, la escasa cooperación por parte de los otros

evacuados hacia las personas de estas condiciones. (3) La escasa iniciativa de los evacuados por intentar acceder a información oficial cualquiera fuese el medio de comunicación. (4) La escasa iniciativa de las personas en usar medidas de autoprotección, lo cual se observa en las personas que no tenían a mano un kit de emergencia, usaban ropa inadecuada y no poseían mascarilla ni otros implementos recomendados. (5) La insuficiente participación y cooperación de personas que usaban vehículos particulares.

De acuerdo con los antecedentes anteriores, es decir, la frecuencia de las erupciones del volcán, la población e infraestructura expuesta, los casos destructivos conocidos en el registro histórico y los comportamientos perfectibles de las personas tanto en un caso real, como en un simulacro de evacuación: se enfatiza la importancia de mejorar la comunicación de los peligros volcánicos hacia la comunidad que vive o visita el volcán Villarrica, para formar una percepción adecuada de los peligros de los cuales están expuestos, y mejorar las herramientas que sirven de soporte para los planes y gestiones de emergencia.

Para conocer el cómo son tratados los temas acerca de las crisis volcánicas conviene revisar el contexto internacional:

Fearnley *et al.* (2018) identifican cuatro desafíos claves a partir de las lecciones aprendidas y la experiencia en la comunicación de crisis volcánicas: (1) la necesidad de recursos para desarrollar el conocimiento sobre los volcanes peligrosos y evaluaciones de su amenaza. (2) Evaluar y comunicar la incertidumbre inherente en el manejo de la información acerca de peligros volcánicos. (3) Establecer y fortalecer redes de sistema de alerta temprana. (4) Incrementar, mejorar e integrar las herramientas que soportan la toma de decisiones. Este último desafío incluye a los mapas de peligro volcánico, los cuales son una de las herramientas esenciales en la comunicación de la información de peligros volcánicos y en la toma de decisiones de los organismos con funciones en la planificación y gestión de emergencias.

Por otro lado, Calder *et al.* (2015) hacen una revisión de 120 mapas de peligro volcánico alrededor del mundo, los cuales poseen diversos enfoques, metodologías de confección y conjuntos de datos. De esta revisión identifican los actuales desafíos que tiene la *International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior* (IAVCEI) para (1) elaborar un marco de clasificación de los mapas de peligro volcánico, (2) promover la convención de la terminología y la comprensión de la incertidumbre para mejorar la comunicación entre las diferentes partes

interesadas y (3) definir cuáles son las buenas prácticas en la elaboración de los mapas de peligro volcánico basado en las lecciones aprendidas y la experiencia. Finalmente, hacen un llamado a las instituciones gubernamentales a modernizar sus mapas de peligro basados únicamente en la geología, a mapas de peligro que consideren simulaciones computacionales de los fenómenos volcánicos de futuros eventos, los cuales son usados para llenar los vacíos de conocimiento que usualmente son dejados por los estudios geológicos.

Thompson *et al.* (2018) enuncian que los factores que controlan actualmente la elección de los diseños visuales de los mapas de peligro son: la metodología utilizada, la práctica científica, la cartografía común, el estado de la actividad volcánica, el entorno sociocultural, el reglamento que tienen las agencias locales y los requisitos políticos. Sin embargo, según las investigaciones de las últimas décadas se ha concluido acerca de la importancia del diseño visual de los mapas de peligro en la comunicación, de cómo influye en su comprensión y uso por parte de usuarios, tanto especialistas, como novicios. Por lo tanto, el diseño visual en sí debería ser un factor considerado en la elaboración de futuros mapas de peligro volcánico.

En este trabajo se pretende avanzar sobre la evaluación y comunicación del peligro y la amenaza volcánica aplicada sobre las circunstancias del volcán Villarrica y sobre los lugareños y turistas, que potencialmente pueden ser afectados por la actividad del volcán. Esto en consideración a la necesidad e importancia que tiene: (1) la comunicación de la incertidumbre para la toma de decisiones. (2) Desarrollar nuevos conocimientos acerca de la amenaza del volcán. (3) La elaboración de herramientas centradas en los usuarios en todo nivel de audiencias. (4) La necesidad de explorar las diferencias en las percepciones de riesgo individuales que pueden afectar la interpretación de los usuarios de los mapas de peligro. Acerca de estos puntos, por ejemplo, Retchless (2014) informa que los usuarios pueden subestimar significativamente la incertidumbre asociada a los peligros naturales (en este caso de inundaciones producto del cambio climático), cuando ellos son novatos y, a la vez, no confían en los expertos. Por otro lado, Andreastuti *et al.* (2017) informa que durante las crisis volcánicas de Sinabung y Kelud las preguntas más comunes de las comunidades del sector hacia los expertos fueron sobre las definiciones de conceptos técnicos y el uso de los mapas de peligros y sus zonificaciones.

Para abarcar estos temas, esta Memoria de título se subdivide en los siguientes capítulos:

En el capítulo 2, *Marco Teórico*, se realiza una revisión bibliográfica acerca de los conceptos generales que se utilizan en el marco de la reducción del riesgo de desastre; además de la definición, origen, características, controles físicos, impactos y medidas de prevención de los principales peligros volcánicos; además de los árboles probabilísticos, su estructuración, tratamiento probabilístico y casos de aplicaciones específicas; además de la comunicación de peligros volcánicos, de cómo influye el diseño de los mapas de peligro y las características intrínsecas de los usuarios en la lectura de los mapas; y además del estudio de usabilidad incorporando tecnología de seguimiento ocular, el cual consiste en el análisis de un conjunto de métricas subjetivas (como la satisfacción del usuario) y objetivas (mediciones de rendimiento como la eficiencia y eficacia, mediciones de procesos como el número de fijaciones, duración de fijaciones, etc., y la atención visual).

El capítulo 3, *Marco Geológico y Volcanológico*, se realiza una revisión bibliográfica breve acerca de la geología del basamento y productos del volcán Villarrica, y su contexto tectónico.

El capítulo 4, *Árbol Probabilístico del Volcán Villarrica*, se realiza una revisión de la actividad histórica eruptiva del volcán Villarrica y se confecciona su árbol probabilístico. El árbol probabilístico es considerado como una herramienta de pronóstico para la toma de decisiones, y una herramienta de comunicación de la incertidumbre inherente a los fenómenos volcánicos (Newhall & Hoblitt, 2002; Sobradelo *et al.*, 2014).

El capítulo 5, *Amenaza del Volcán Villarrica*, se identifican y cuantifican variables de exposición poblacional y de infraestructura y sitios críticos; y, finalmente, se realiza una evaluación de la amenaza del volcán Villarrica incorporando evaluaciones de peligro volcánico existentes.

El capítulo 6, *Mapa de Peligro Simplificado del Volcán Villarrica*, se confecciona un diseño simplificado y orientado a la atención de los usuarios del mapa de peligro del volcán Villarrica, con su usabilidad probada empíricamente a través de un estudio de usabilidad incorporando tecnología de seguimiento ocular y cuestionarios de percepción de riesgo y satisfacción.

Finalmente, el capítulo 7 y 8, *Discusiones y Conclusiones*, condensa y relacionan todos los productos generados en este trabajo y se exponen respuestas a las problemáticas presentadas.

Todos los mapas elaborados en este informe son realizados en el sistema de coordenadas WGS 1984 UTM Zona 19 S, proyección *Trasverse Mercator*, *Datum* WGS 1984, unidad metro.

1.2. Ubicación y Accesos

El cráter del volcán Villarrica se localiza en los 39°25' latitud sur y los 71°56' longitud oeste a una altura de 2.847 m s.n.m., cuya extensión del edificio volcánico queda comprendido dentro de las comunas de Pucón y Villarrica en la Provincia de Cautín, Región de La Araucanía; y la comuna de Panguipulli en la Provincia de Valdivia, Región de Los Ríos, Chile. El volcán se ubica a ~ 670 km levemente al suroeste de Santiago, capital de Chile; a ~ 305 km al sureste de Concepción, capital de la Región del Biobío; a ~ 95 km al sureste de Temuco, capital de la Región de La Araucanía; y a ~120 km al noreste de Valdivia, capital de la Región de Los Ríos (Fig. 1.1).

El acceso (Fig. 1.1) desde el norte (Santiago) se realiza por la Ruta 5 Sur (Carretera Panamericana) que conecta con Concepción por la Ruta 152 (Autopista del Itata), N-48-O (camino a Bulnes) o 146 (Autopista Valles del Biobío) y con Temuco por la Avenida Huichahue o Carretera Longitudinal Sur. El acceso desde el sur (Valdivia) se realiza por la Ruta 205 (camino a San José de Mariquina) o 204 (camino a Los Lagos) que conectan con la Ruta 5 Sur. Desde la mencionada Ruta 5 Sur, a Villarrica se accede por la Ruta 199 en el norte y por la S-91 (Loncoche – Villarrica) en el sur. A Pucón se accede desde Villarrica por la mencionada Ruta 199. A Coñaripe (comuna de Panguipulli) se accede desde Villarrica por la Ruta S-95-T, que luego cambia su rol a T-95-S (camino a Coñaripe).

Existen muchos caminos que permiten aproximarse a las faldas del volcán, siendo la Ruta S-887 la más accesible (pavimentada hasta el kilómetro 5) y, en consecuencia, la más transitada, la cual conecta Pucón con la entrada Rucapillán del Parque Nacional Villarrica. Existen en los alrededores del volcán Villarrica diversos senderos que permiten recorrer gran parte del edificio volcánico, los cuales son transitados por visitantes durante todo el año. Existe movilización colectiva durante todo el año, desde Temuco es posible conseguir buses que van a Pucón de lunes a domingo a todas horas. En temporada de turismo alta, es más factible encontrar servicio de buses directo desde Concepción o Santiago a Pucón, pero con horarios más limitados. Dentro de las comunas existen buses rurales que conectan Villarrica, Pucón, Coñaripe, Curarrehue y Caburgua. Para subir al volcán por alguna de sus rutas hay que optar por taxis o movilización privada.

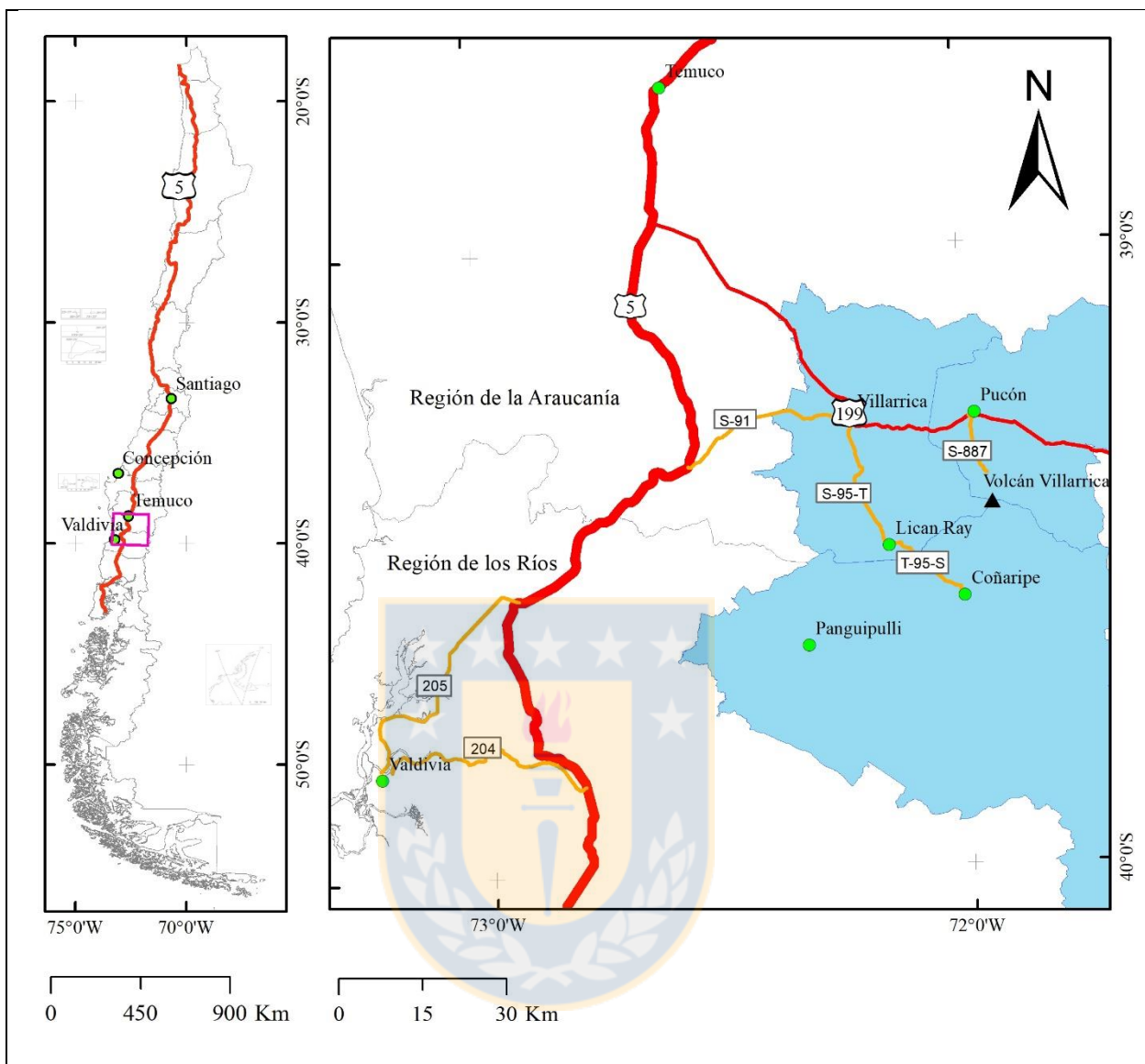


Figura 1.1: Mapa de ubicación y accesos del volcán Villarrica. A la izquierda, se muestra un mapa general de Chile y, a la derecha, un mapa de acercamiento a las regiones de La Araucanía y Los Ríos. En círculos verdes se localizan las ciudades y pueblos relevantes. En triángulo negro se localiza el volcán Villarrica. Las líneas rojas representan las rutas principales y, en naranjas, las rutas secundarias de acceso al volcán Villarrica. Las líneas grises representan los límites regionales y, los polígonos azules, los comunales de Villarrica, Pucón y Panguipulli.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Evaluar el peligro y la amenaza del volcán Villarrica mediante el uso de un árbol probabilístico y un análisis de exposición. Además, proporcionar una comunicación del peligro volcánico y los

actuales planes de emergencias que sean adecuados para usuarios no especializados a través de un mapa de peligro simplificado.

1.3.2. Objetivos Específicos

1. Determinar la probabilidad de ocurrencia y zonas de afectación de diferentes fenómenos volcánicos a través de la confección y uso de un árbol probabilístico del volcán Villarrica.
2. Cuantificar la amenaza volcánica alrededor del volcán Villarrica a través de la confección de una base de datos de población e infraestructura en las comunas de Pucón, Villarrica y Panguipulli, y su integración con evaluaciones existentes de peligro volcánico.
3. Evaluar la usabilidad de un nuevo mapa de peligro simplificado del volcán Villarrica como herramienta de comunicación de peligros e información de planes de emergencias utilizando métodos empíricos de atención visual.

1.4. Metodología de Trabajo

Objetivo 1:

- Determinación de los nodos del árbol probabilístico basándose en propósitos específicos para su confección y en la disponibilidad de la información de la historia eruptiva.
- Establecimiento de la actividad eruptiva histórica del volcán Villarrica con base en la revisión y evaluación de diversas fuentes bibliográficas.
- Construcción de una base de datos organizada y seleccionada de la actividad eruptiva histórica del volcán Villarrica, delimitada por los nodos escogidos.
- Confección del árbol probabilístico mediante el tratamiento probabilístico de los datos y la organización de la información en un diagrama jerárquico.

Objetivo 2:

- Establecimiento de información poblacional y de infraestructura y sitios críticos basándose en la revisión de fuentes públicas de información de las comunas de Pucón, Villarrica y Panguipulli.
- Cuantificación de la información poblacional y de infraestructura y sitios críticos en una malla geolocalizada.

- Integración de la información poblacional y de infraestructura y sitios críticos mediante una formulación matemática.
- Establecimiento de una base de datos geolocalizada de peligros del volcán Villarrica basándose en los modelos computacionales elaborados por un grupo de investigación de pregrado supervisado por el Dr. José Luis Palma.
- Integración de los peligros del volcán Villarrica y la exposición poblacional y de infraestructura y sitios críticos para generar una base de datos geolocalizada de amenaza del volcán Villarrica.
- Confección de mapas, tablas y gráficos que muestren los resultados del análisis de amenaza del Volcán Villarrica.

Objetivo 3:

- Confección de un diseño de mapa orientado a la atención basado en los criterios de simplicidad, jerarquía y concisión, y en la revisión y evaluación de diversas estrategias comunicacionales de trabajos anteriores.
- Confección de un mapa simplificado de peligro volcánico de la entrada del Parque Nacional Villarrica sector Rucapillán.
- Confección de un estudio de usabilidad incorporando tecnología de seguimiento ocular para evaluar tanto cualitativamente, como cuantitativamente los diseños de mapas de peligro mediante un experimento elaborado en el programa OGAMA 5.0.1 y cuestionarios de percepción de riesgo y satisfacción.
- Aplicación del estudio de usabilidad incorporando tecnología de seguimiento ocular en la entrada del Parque Nacional Villarrica sector Rucapillán.
- Análisis de los resultados obtenidos del estudio de usabilidad incorporando tecnología de seguimiento ocular mediante la comprobación de la hipótesis nula o alternativa con análisis de varianza y otras pruebas estadísticas.

1.5. Agradecimientos

Agradezco a mi familia que, sin su apoyo incondicional, este trabajo nunca hubiese sido posible. A mi profesor guía Dr. José Palma que contribuyó no solo con su conocimiento técnico, sino que también con sus consejos en relación con mi desarrollo profesional. A Franco Vera, Constanza Jorquera, Nicolás Álvarez y Diego Arias, quienes conforman el más reciente equipo de investigación de pregrado de la Universidad de Concepción supervisado por el Dr. José Palma, a ellos por su buena disposición a compartir información sobre sus avances en sus propias Memorias de título. A don Luis Vázquez, encargado del área de geomática del Departamento de Ciencias de la Tierra, por su ayuda y buena disposición en cuanto a la enseñanza del uso de los programas y el permiso del uso de la sala de geomática. A la Dra. Jan Lindsay por su valiosa disposición a conversar acerca de estos temas como especialista en esta área de trabajo. A Dr. Álvaro Amigo, don Felipe Flores y don Rodrigo Calderón, de la Unidad de Geología y Peligro de Sistemas Volcánicos del SERNAGEOMIN, por su interés en el tema y aportes en cuanto a lo que se está haciendo oficial y actualmente a nivel nacional. A Alejandra González por compartir una valiosa e inédita información relacionada con los árboles probabilísticos. A los profesionales doña Laura Sandri y don Tom Wilson por su buena disposición a responder y resolver dudas puntuales relacionadas con mi investigación. A Dr. Arturo Quinzio, jefe de carrera del Departamento de Ciencias de la Tierra, por su ayuda a convocar a estudiantes para testear el estudio de usabilidad incorporando tecnología de seguimiento ocular. A Felipe Henríquez, Gastón Bravo y Carla Ramírez por su cooperación para ensayar el experimento y responder los cuestionarios previo a su aplicación, lo que permitió resolver problemas técnicos que, sin su paciencia y confianza, no hubiesen sido posible detectar. A doña Carolina Rojas y María Aravena, secretarías del Departamento de Ciencias de la Tierra, por guiarme y gestionar muchos de los trámites que fueron necesarios para el desarrollo de este trabajo. A doña Evelyn Salamanca, profesora del área de Oftalmología de la Universidad de Concepción por la asesoría respecto a la implementación de tecnología en la evaluación de los ojos. Finalmente, a don Marcelo Saavedra, encargado regional de Flora Silvestre de la CONAF, y a todo el equipo de la CONAF del sector Rucapillán, quienes con una gestión y disposición ejemplar permitieron la aplicación del experimento y los cuestionarios en estancias del Parque Nacional Villarrica.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Conceptos Generales

Fournier d'Albe (1979) formula una expresión que representa el riesgo (*risk*) a través de la evaluación y estimación cuantitativa, la cual define, citando un informe de 1972 de la *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization* (UNESCO), como: la posibilidad de una pérdida, la cual puede ser la vida, la propiedad o la capacidad productiva, cuya expresión es la siguiente:

$$risk = value \times vulnerability \times hazard$$

Define el valor (*value*) como una variable que puede expresar el número de personas en riesgo, el valor del capital (del terreno, las construcciones, etc.) o la capacidad productiva, la cual puede cambiar en el curso del tiempo debido a procesos naturales o acciones deliberadas.

Vulnerabilidad (*vulnerability*) es una medida de la proporción del valor el cual está vinculado a la pérdida como resultado de un evento dado. Los fenómenos volcánicos frecuentemente tienen un valor cercano al 100% sobre la infraestructura, exceptuando la caída de ceniza que su valor es menor al 100%. Sin embargo, sobre la población, presenta un amplio rango dependiendo de la capacidad de evacuación, del sistema de alerta temprana y la escala de tiempo de las erupciones violentas.

Finalmente, define peligro (*hazard*) como la probabilidad que un área en particular sea afectada por una manifestación destructiva dado un periodo de tiempo.

Martí (2017) añade en la expresión el concepto de medidas de mitigación (*mitigation measures*), las cuales son entendidas como cualquier acción que pueda ser implementada para reducir el riesgo, por ejemplo: evaluación de peligro, planificación territorial, planificación de emergencias, reducción de la vulnerabilidad física, monitoreo o educación. La expresión queda actualizada de la siguiente manera:

$$risk = \frac{value \times vulnerability \times hazard}{mitigation\ measures}$$

Por otra parte, en un artículo del 2016 de la *United Nations Office for Disaster Risk Reduction* (UNISDR) es presentado un Informe de Trabajo Intergubernamental de Expertos de Composición Abierta sobre los Indicadores y la Terminología Relacionados con la Reducción del Riesgo de

Desastres, en el cual definen (en un sentido amplio) *riesgo de desastre* como: la posibilidad de que se produzcan muertes, lesiones, destrucción o daños de bienes en un sistema, una sociedad o una comunidad en un período de tiempo concreto, determinados de forma probabilística como una función del peligro, la exposición, la vulnerabilidad y la capacidad.

$$\text{riesgo} = f(\text{peligro}, \text{exposición}, \text{vulnerabilidad}, \text{capacidad})$$

La *evaluación de riesgo*, en su defecto, es el enfoque cualitativo o cuantitativo para determinar la naturaleza y el alcance del riesgo de desastres.

Definen *peligro* como el proceso, fenómeno o actividad humana que puede ocasionar muertes, lesiones u otros efectos en la salud, daños a los bienes, interrupciones sociales y económicas o daños ambientales.

Exposición es la situación en que se encuentran las personas, la infraestructura, las viviendas, las capacidades de producción y otros activos humanos tangibles situados en las zonas expuestas a peligro, por ejemplo: número de personas o tipos de bienes en una zona.

Vulnerabilidad son las condiciones determinadas por factores o procesos físicos, sociales, económicos y ambientales que aumentan la susceptibilidad de una persona, una comunidad, los bienes o los sistemas a los efectos de los peligros.

Capacidad es la combinación de todas las fortalezas, los atributos y los recursos disponibles dentro de una organización, comunidad o sociedad que pueden utilizarse para gestionar y reducir los riesgos de desastres y reforzar la resiliencia.

Otros términos relacionados a la evaluación de riesgos son: *Resiliencia* la cual es la capacidad que tiene un sistema, una comunidad o una sociedad expuestos a un peligro para resistir, absorber, adaptarse, transformarse y recuperarse de sus efectos de manera oportuna y eficiente.

Mitigación es la disminución o reducción al mínimo de los efectos adversos de un suceso peligroso, y *prevención* son las actividades y medidas encaminadas a evitar los riesgos de desastres existentes y nuevos.

Preparación son los conocimientos y capacidades que desarrollan los gobiernos, las organizaciones, las comunidades y las personas para prever, responder y recuperarse de forma efectiva de los impactos de desastres.

Respuesta son las medidas directamente antes, durante o inmediatamente después de un desastre con el fin de salvar vidas, reducir impactos en la salud, velar por la seguridad pública y atender las necesidades básicas de subsistencia de la población afectada.

Recuperación es el restablecimiento o mejora de los medios de vida y salud, así como de los bienes, sistemas y actividades económicas, físicas, sociales, culturales y ambientales de una comunidad o sociedad afectada por un desastre.

Fitzgerald *et al.* (2018), por su parte, agrupa estos conceptos en una escala de tiempo según si corresponden a un antes, durante o después de una crisis volcánica y añade los procesos y productos de comunicación que debiesen realizarse en cada uno de las etapas para los peligros de balísticos (Fig. 2.1), sin embargo, puede también extrapolarse a peligros volcánicos en general.

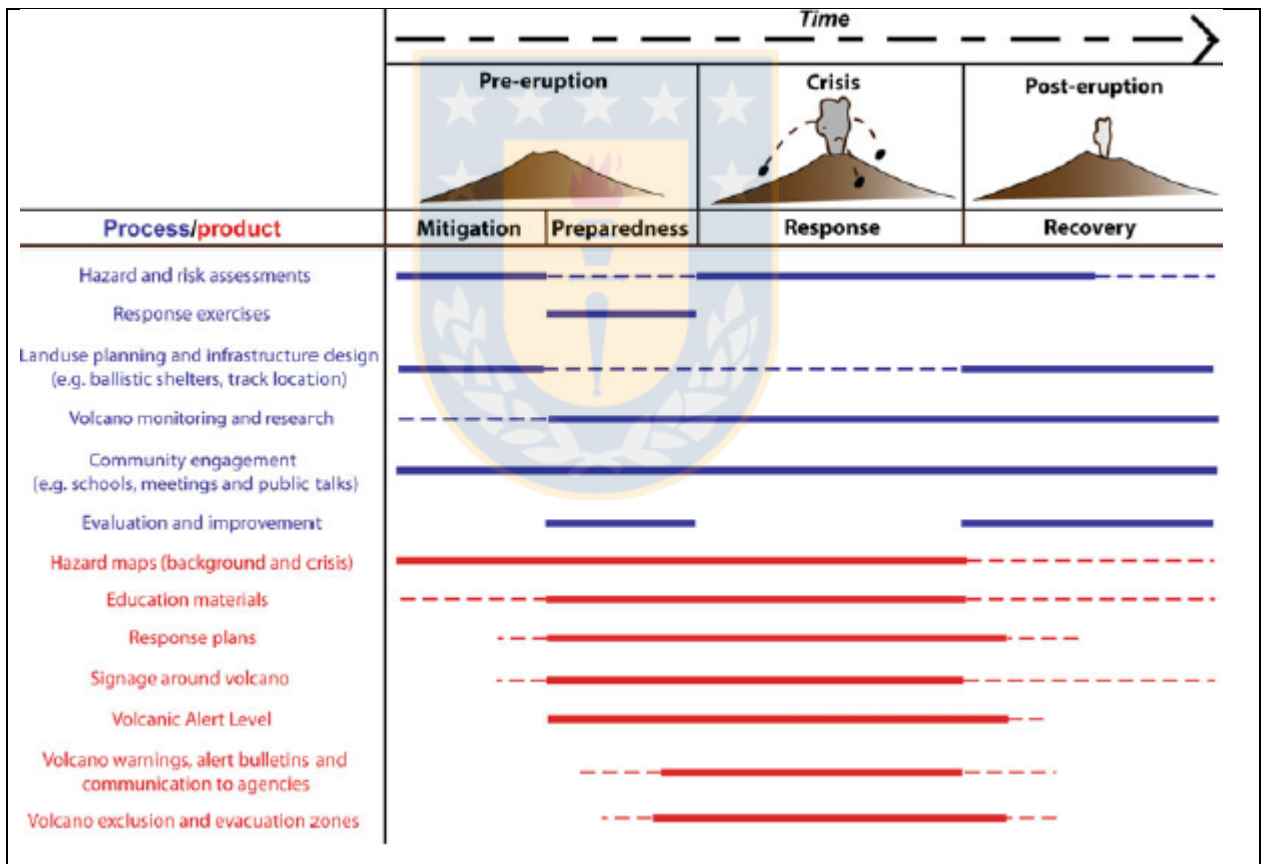


Figura 2.1: Peligros de balísticos e implementación de procesos y productos de comunicación. Los procesos (en rojo) y productos (en azul) implementados en los diferentes estados del volcán y en cada etapa de riesgo o manejo de emergencias. El nivel de importancia se indica mediante el estilo de líneas, siendo las continuas las que indican mayor importancia. Obtenido de Fitzgerald *et al.* (2018).

UNISDR (2016) definen, además, *sistema de alerta temprana* como el conjunto de capacidades necesarias para generar y difundir información de alerta oportuna y significativa para permitir a las personas, comunidades y organizaciones amenazadas por un peligro se preparen y actúen de manera apropiada y con tiempo suficiente para reducir la posibilidad de daños o pérdidas.

Finalmente, definen *impacto de desastre* como el efecto total de un suceso peligroso o un desastre incluidos los efectos negativos (por ejemplo, pérdidas económicas) y los efectos positivos (por ejemplo, beneficios económicos como el desarrollo de suelos fértiles). Otros ejemplos son: muertes, lesiones, enfermedades, etc.

Ambos conjuntos de terminologías, la de Fournier d'Albe (1979) y la de UNISDR (2016) son propuestas similares, entendiendo *valor* como un concepto similar a *exposición* y las *medidas de mitigación* como un concepto similar a *capacidad*, y son ambas ampliamente utilizadas por la comunidad científica. Para efecto de este trabajo se utilizan estas definiciones.

Por otra parte, en este trabajo se considera la definición *amenaza* (traducción de *threat*) como la multiplicación de factores cuantificados de peligro y de exposición, los cuales son una suma de puntajes asignados a diversas cuestiones asociadas a los peligros, como: tipo de volcán, índice de explosividad volcánica (IEV), ocurrencia de actividad explosiva, recurrencia de la erupción, ocurrencia de flujos piroclásticos, lahares, flujos de lava o tsunamis en el Holoceno, potencial de explosión hidrotermal, potencial de colapso en el sector, presencia de fuente de lahar primario, y observaciones de monitoreo volcánico; y cuestiones asociadas a la exposición, como: población base dentro de los primeros 30 km, fatalidades o evacuaciones registradas históricamente, exposición de la aviación local o regional, presencia de infraestructura de energía o transporte, presencia de áreas sensibles como zonas turísticas, de conservación o importancia económica, y si el volcán forma parte de una isla (Ewert *et al.*, 2018). Se debe evitar confusiones en la terminología, puesto que otras instituciones nacionales o internacionales ocupan el término *amenaza* para referirse al fenómeno volcánico en sí, es decir, como sinónimo de peligro (traducción de *hazard*).

2.2. Peligros Volcánicos

Los peligros de origen volcánico afectan directa o indirectamente en la población, causando pérdidas de la vida de las personas y sus propiedades. En el siglo XX se estiman unas 91.725

personas muertas, 16.013 personas heridas, 291.457 personas que se quedaron sin hogar y 5.281.906 personas evacuadas o afectadas de algún modo en el mundo (Witham, 2005). El impacto de desastre, dependiendo del tamaño de la erupción, puede ser tanto local, como regional o global. Los peligros volcánicos poseen una complejidad intrínseca de sus procesos los cuales son de naturaleza y comportamientos variados, resultando frecuentemente en riesgos múltiples que interactúan de manera secuencial. Tilling (2005) clasifica los peligros volcánicos en eventos *de peligros directos* los que son producidos durante o poco tiempo después de la erupción (dentro de minutos o varios días) y los *eventos de peligros indirectos* como procesos que son incidentales a los fenómenos eruptivos en sí (Tabla 2.1).

Tabla 2.1: Principales tipos de peligros volcánicos. Clasificación de los peligros volcánicos en directos e indirectos. Modificado de Tilling (2005).

Tipo de peligro	Peligro
Peligros directos	Caídas de tefra
	Proyectiles balísticos
	Flujos piroclásticos y oleadas
	Avalanchas de detritos
	Lahares
	Inundaciones
	Flujos de lava
	Explosiones freáticas
	Gases volcánicos y lluvias acidas
	Peligros indirectos	Terremotos
Tsunamis	
Lahares secundarios	
Flujos piroclásticos secundarios	
Erosión y sedimentación post erupción	
Efectos atmosféricos	
Cambio climático	
Hambruna y enfermedad	
Encuentro de aeronaves con ceniza volcánica	

A continuación, se describen los fenómenos volcánicos relevantes para este trabajo los cuales son: (1) caída de tefra, (2) proyectiles balísticos, (3) flujos y oleadas piroclásticas, (4) lahares y (5) flujos de lava, donde se añaden, además, sus posibles impactos y medidas preventivas o de mitigación.

2.2.1. Caída de Tefra

La tefra está constituida por fragmentos de vidrio, minerales, rocas y lavas que han sido expulsados a la atmósfera y que luego caen nuevamente sobre la superficie terrestre, los cuales varían su tamaño de ceniza (menor a 2 mm), a lapilli (2 a 64 mm), hasta bloques o bombas (mayor a 64 mm) los cuales son producidos cuando el magma y el material del conducto es desintegrado explosivamente (Scott, 1993; Steward *et al.*, 2018). El fenómeno de caída de tefra, especialmente ceniza, ocurre cuando la tefra y los gases son dispersados formando columnas eruptivas, las cuales son conducidas hacia arriba por la descompresión y expansión de los gases y luego trasportadas por corrientes convectivas hasta que su densidad disminuye de modo que sus partículas más grandes y pesadas caen, y las menos grandes y pesadas se dispersan a favor del viento (Blong, 1984). Típicamente, al incrementarse la distancia desde el centro de emisión, la tefra presenta una disminución del tamaño de grano y forma depósitos más delgados (Scott, 1993).

Los principales controles físicos que influyen en la altura de la columna eruptiva y las características de dispersión de la tefra son: la gravedad, densidad, tamaño y forma de las partículas, la fricción con el aire, la densidad y viscosidad del aire, la difusividad y la velocidad del viento (Martí, 2017).

Los impactos varían según la proximidad al volcán, la cantidad de tefra que ha sido depositada, sus propiedades físicas y químicas, las características del ambiente receptor, tales como el clima, el uso del terreno y la capacidad de las comunidades afectadas. Steward *et al.* (2018) afirma que la caída de ceniza es el peligro volcánico con los impactos más complejos y multifacéticos, los cuales resume y clasifica en sectores como: salud pública, infraestructura crítica, agricultura, edificios y economía (Tabla 2.2). Por otro lado, Scott (1993) también reporta, aunque rara vez, la posibilidad de incendios producto de cenizas volcánicas, tanto por los relámpagos formado en las columnas eruptivas, como por los fragmentos incandescentes; y la posibilidad de cambios en las dinámicas de erosión y sedimentación de las escorrentías. Lechner *et al.* (2018), también describe como el aumento de la temperatura puede afectar a las turbinas de los jets a propulsión a chorro y como según el tamaño de las partículas, densidad y naturaleza de las cenizas pueden ser afectados los sistemas eléctricos, hidráulicos y de navegación de los aviones. También la acumulación de silicatos provenientes de la ceniza puede provocar el estancamiento de los motores.

Tabla 2.2: Impactos de la ceniza volcánica sobre la sociedad. Se clasifican los impactos de caída de ceniza en aquellos sectores relacionados con la salud pública, infraestructura crítica, agricultura, edificios y economía. Modificado de Brown *et al.* (2014) *in* Steward *et al.* (2018).

Sector	Impactos
Salud pública	De modo indirecto puede causar pérdida de vidas humanas por daños estructurales de infraestructura por acumulación de ceniza o accidentes de tráfico por reducción de la visibilidad y tracción. Puede causar efectos adversos en la salud de las personas como irritación en los ojos y vías respiratorias, y exacerbar el asma u otras enfermedades respiratorias crónicas (Horwell & Baxter, 2006 <i>in</i> Steward <i>et al.</i> , 2018). En algunos casos puede causar silicosis por la presencia de silicio cristalino respirable. Puede causar también estrés psicológico en los individuos al disrumpir los medios de sustentación de las comunidades (Carlsen <i>et al.</i> , 2012 <i>in</i> Steward <i>et al.</i> , 2018).
Infraestructura crítica	Puede causar daño o disrupción en redes de electricidad por combustión súbita y falla de aisladores (Wilson <i>et al.</i> , 2012 <i>in</i> Steward <i>et al.</i> , 2018). Daños en redes de transporte a causa de la reducción de la visibilidad y tracción. Daños en sistemas de drenado abiertos y en las plantas de tratamiento de aguas. Otros daños indirectos son el bloqueo de los sistemas de manejo de aire y agua.
Agricultura	Comúnmente los volcanes poseen suelos fértiles por el aporte nutricional de los mismos productos volcánicos, sin embargo, a corto plazo la caída de ceniza puede causar contaminación y enterramiento de pastizales y cultivos hortícolas causando reducción de los alimentos y su calidad. También pueden causar efectos adversos en la salud del ganado al contaminar sus alimentos y, rara vez, incluso causarles fluorosis crónica. Otros efectos indirectos son los daños a la maquinaria, infraestructura y vehículos, y causar la interrupción de servicios esenciales como fuentes de alimentación, transporte y sistemas de comunicación.
Edificios	La carga asociada con la acumulación de ceniza (alrededor de 10 cm de espesor) puede causar el colapso de los materiales de los techos o las estructuras de soporte (Blong, 1984; Sprence <i>et al.</i> , 2005 <i>in</i> Steward <i>et al.</i> , 2018). Se debe considerar que los techos sin diseño ingenieril, de gran envergadura, planos y de poca altura son especialmente vulnerables al colapso y, por otro lado, la ceniza húmeda es hasta dos veces más densa que la seca. La ceniza puede causar también abrasión y corrosión sobre los materiales.

Tabla 2.2 (continuación): Impactos de la ceniza volcánica sobre la sociedad.

Economía	Las pérdidas económicas pueden surgir por el daño físico de activos y la reducción en la producción. La mayoría de las actividades pueden ser impactadas con la acumulación de ceniza desde los 1 cm de espesor. Otras pérdidas pueden resultar de las actividades administrativas de prevención como, por ejemplo, la clausura de edificios y las evacuaciones. Durante o después de la caída de ceniza, otras pérdidas pueden deberse a la limpieza de caminos, propiedades y aeropuertos.
-----------------	--

La caída de ceniza puede tener implicancias tanto en las cercanías, como a cientos de kilómetros del volcán, y puede haber un tiempo considerable de exposición de las personas a las partículas de ceniza respirable. Por otro lado, la lluvia puede jugar un rol clave en la disminución de la suspensión de ceniza, pero también puede causar la disolución de elementos tóxicos de ésta y por lo tanto la contaminación de aguas (Baxter *et al.*, 1986).

Baxter *et al.* (1986) propone como medidas de prevención, en términos generales, las siguientes acciones: (1) testear en laboratorio el tamaño de las partículas, la cristalinidad del silicio, los elementos tóxicos proclives a la lixiviación y los elementos tóxicos biodisponibles. (2) El uso de mascarillas de alta eficiencia o equipo de protección de respiración. (3) Proteger casas y oficinas de la infiltración de ceniza. (4) Evadir el consumo de aguas superficiales, tales como las aguas de pozos. (5) Observar la salud de los animales de granja y analizar sus productos lácteos en laboratorio. (6) Utilizar gafas de protección de alta exposición. (7) Prevenir la acumulación de ceniza sobre rutas e infraestructura en general. (8) Mantener el control del tráfico. (9) Advertir con folletos informativos a todos los lugareños previo a la erupción. (10) Cubrir aisladores de los sistemas eléctricos u organizar equipos de emergencias adecuadamente. (11) Designar refugios de emergencias con una infraestructura resistente a altas cargas. De Blong (1984) se añaden las siguientes medidas: (12) Tener en cuenta el diseño de los techos (alto ángulo) en las nuevas construcciones o remodelaciones. (13) Construir refuerzos estructurales tanto en techos, como en paredes de la infraestructura. (14) Remover o estabilizar la tefra en el terreno. (15) Considerar los diseños de los filtros para las maquinarias.

Finalmente, Lechner *et al.* (2018) exponen que generar un pronóstico preciso de la distribución de ceniza por varias semanas, y generar redes globales y una comunicación temprana y constante entre

las diferentes instituciones involucradas (observatorios volcanológicos, oficinas de operaciones aéreas, centro de control aéreo, pilotos, etc.) son desafíos claves para evitar accidentes aéreos provocados por la nube de ceniza.

2.2.2. proyectiles Balísticos

En contraste a la caída de tefra, los proyectiles balísticos abandonan el cráter a altas velocidades (decenas a centenares de metros por segundo) y siguen trayectorias que no son afectadas por la dinámica de las columnas eruptivas o por el viento (Scott, 1993). La tefra más densas y de mayor tamaño, la cual puede ser desde unos cuantos centímetros a bloques y bombas (mayor a 64 mm), son eyectados por la energía explosiva de la erupción, siendo un fenómeno volcánico común y localizado en las áreas más proximales al volcán (Tilling, 2005). La tefra es expulsada a casi 1 km de altura en el aire y, típicamente, alcanzando hasta los 5 km del centro de emisión (Blong, 1984).

Los principales controles físicos que influyen en la trayectoria y alcance de los proyectiles balísticos son: la gravedad, la densidad de los fragmentos, la fricción del aire, la intensidad de la explosión y el ángulo de eyección (Martí, 2017).

Los potenciales impactos son causados por la energía de impacto en la que caen los fragmentos, la cual depende de la densidad, la masa y el diámetro de la bomba volcánica (Fig. 2.2), de lo cual se estima que tan solo entre 400 J y 1.000 J de energía cinética es necesaria para que un fragmento penetre un techo con chapa de metal (Pomonis *et al.*, 1999 *in* Fitzgerald *et al.*, 2018; Jenkins *et al.*, 2014 *in* Fitzgerald *et al.*, 2018). Por lo tanto, los fragmentos balísticos tienen la capacidad de destruir infraestructura y, rara vez, iniciar incendios (Tsuya, 1995 *in* Scott, 1993). Esto, evidentemente, puede causar impactos en pérdidas humanas y económicas. Muchas personas han resultado heridas, sufriendo traumatismos, laceraciones, quemaduras, abrasiones y moretones como consecuencia de proyectiles balísticos (Blong, 1984). Los proyectiles balísticos pueden afectar especialmente a turistas, excursionistas, montañistas, locales y volcanólogos, quienes visitan o viven en las zonas más proximales del volcán (Fitzgerald *et al.*, 2018).

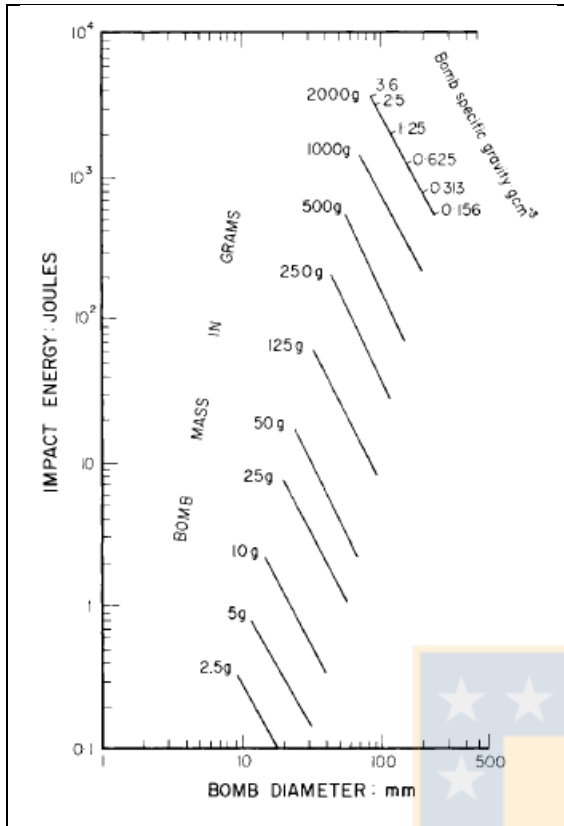


Figura 2.2: Energía de impacto de los proyectiles balísticos. El eje de las ordenadas es el diámetro de la bomba en *mm*, y el de las abscisas es la energía de impacto en *joule*, mientras mayor es el diámetro, la energía de impacto disminuye levemente. Cada curva representa una masa en *g*, mientras mayor es la masa, la energía de impacto aumenta considerablemente. Cada curva de masa varía por la densidad en $g\ cm^{-3}$, mientras mayor es la densidad, la energía de impacto aumenta. Obtenido de Blong (1981) *in* Blong (1984).

Los proyectiles balísticos ocurren en las vecindades de los volcanes en conjunto con otros fenómenos volcánicos muchos más desbastadores, por lo que las únicas medidas de protección son definir zonas de restricción y evacuar a la comunidad a tiempo, esto basado en un sistema de alerta temprana adecuada (Baxter *et al.*, 1986).

Fitzgerald *et al.* (2018) añaden la construcción de refugios que soporten los altos impactos de proyectiles balísticos en zonas de alto riesgo como medida de prevención.

2.2.3. Flujos y Oleadas Piroclásticas

Los flujos y oleadas piroclásticas están compuestos por una mezcla de magma recién fragmentado, gases tanto de origen magmáticos, como incorporados de la superficie terrestre, y clastos líticos derivados del conducto o substraídos del edificio volcánico (Dufek *et al.*, 2015). Este fenómeno involucra un movimiento extremadamente rápido (de varias decenas a cientos de metros por segundo) y altamente abrasivo, de una masa seca y caliente (300 a más de 800°C) que barre con todo lo que se encuentre en su camino a lo largo de la superficie del suelo (Tilling, 2005). Los

flujos y las oleadas piroclásticas presentan, comúnmente, un continuo entre ellos, pero las oleadas se distinguen de los flujos piroclásticos por tener relativamente una baja proporción de materiales sólidos respecto a los gases y, por lo tanto, una menor densidad (Dufek *et al.*, 2015).

Los flujos piroclásticos son generados cuando la fase de empuje convectivo de una columna de tefra ascendente no puede retomar la fase de empuje del gas inicial, esto ocurre si el arrastre del aire no es suficiente para mantener la densidad de la columna por debajo de la atmósfera circundante, entonces ocurre el colapso de la columna gravitacional con una dispersión lateral hacia los flancos del volcán y con tendencia a ser afectado por el control topográfico. Por otro lado, las oleadas piroclásticas involucran movimientos laterales turbulentos que se expanden con una baja concentración de sólidos, los cuales se acumulan en las depresiones, pero al ser menos densos y con mayor movilidad pueden cubrir las altas topografías e incluso ingresar a los valles adyacentes (Blong, 1984; Tilling, 2005). Las oleadas piroclásticas también pueden ser frías, sin embargo, éstas son las que se originan por explosiones hidrotermales (Scott, 1989 *in* Tilling, 2005). Los flujos y oleadas piroclásticas son generadas también por el colapso de domos y explosiones laterales (Scott, 1993).

Los principales controles físicos tanto para flujos y oleadas piroclásticas son la gravedad, la distribución del tamaño del grano, la temperatura, la cantidad de movimiento, la proporción entre partículas y gases, la proporción de piroclastos o líticos juveniles, la topografía, el régimen de flujo y la masa total (Martí, 2017).

Los flujos y oleadas piroclásticas representan un peligro extremo para las regiones expuesta debido a la capacidad de enterrar bajo gruesas capas de depósitos piroclásticos, cuyo grosor depende directamente de su densidad, de quemar letalmente por sus altas temperaturas, de destruir por su altas presiones dinámicas (siendo mayores en las oleadas piroclásticas) y de causar otros impactos por su concentración de ceniza fina y su capacidad de incorporar y transportar rocas sueltas, árboles y materiales de construcción que contribuyen a aumentar su fuerza de impacto (Cole *et al.*, 2015).

Los daños causados dentro del eje del flujo son completos, sin embargo, en las periferias son generalmente moderados (Cole *et al.*, 2015). Un impacto indirecto es la formación de tsunamis cuando una corriente de densidad piroclástica ingresa a un cuerpo de agua, afectando a islas y costas a cientos de kilómetros de distancia (Carey *et al.*, 1996 *in* Cole *et al.*, 2015).

La protección contra los flujos y oleadas piroclásticas son casi imposibles por lo altamente destructivos que son, sin embargo, algunos países construyeron bunkers contra las corrientes de densidad piroclástica en las zonas propensas a ser afectadas por estos fenómenos, para un número limitado de personas que no alcanzan a evacuar a tiempo, pero la experiencia ha demostrado que no son siempre efectivos ocurriendo igualmente casos letales (Gertisser *et al.*, 2011 in Lavigne *et al.*, 2018). Por lo tanto, la mejora de las capacidades de gestión de crisis a través de los sistemas de monitoreo y alerta temprana, así como las comunicaciones entregadas a tiempo y en un lenguaje simple y claro, involucrando un desarrollo de gestión tanto con un enfoque *top-down* (desde las autoridades hacia la comunidad), como *bottom-up* (desde la comunidad hacia las autoridades), son actualmente las principales medidas de mitigación para empoderar a las comunidades con un desarrollo propio y culturalmente aceptable para hacer frente a las crisis. Además, se deben iniciar campañas de difusión alrededor de los volcanes inactivos, especialmente porque son donde la percepción del riesgo volcánico suele ser más bajo (Lavigne *et al.*, 2018).

2.2.4. Lahares

Los lahares ocurren durante las erupciones volcánicas o de manera menos predecible, a través de otros procesos en laderas volcánicas empinadas, en el momento que grandes masas de agua mezclada con sedimentos, comúnmente de origen volcánico, arrasan valle abajo incorporando otros sedimentos y agua adicionales (Vallance & Iverson, 2015). Los *lahares primarios* nacen de los flancos del volcán, a la vez que ocurre la actividad eruptiva como, por ejemplo, cuando los flujos incandescentes se mezclan y derriten la capa de hielo de los glaciares o la nieve sobre un volcán para generar flujos saturados en agua que, luego, se combinan con material volcánico juvenil o preexistente disponible sobre las laderas; o cuando se desborda agua de un lago durante la actividad volcánica (Mothes & Vallance, 2015). En contraste, los *lahares secundarios* se originan comúnmente después de que disminuye la actividad eruptiva, cuando ocurren fuertes lluvias o un lago se desborda y remueve la ceniza u otros detritos volcánicos sobre los flancos del volcán, la intensidad de estos últimos es limitado por la intensidad, acumulación y duración de las lluvias (Mothes & Vallance, 2015).

Los lahares pueden tener un régimen laminar o turbulento que depende de los tamaños de grano y componentes sedimentarios, los cuales varían con el tiempo, la posición en el valle y la distancia

aguas abajo, exhibiendo una o varias fases: flujo de detritos, de transición o fangoso (Vallance 2000 *in* Mothes & Vallance, 2015). La transición entre un lahar y una corriente normal (es decir de inundación) es principalmente una función de la disminución de la concentración de sedimentos, por otro lado, una avalancha de detritos saturado en agua puede transformarse posteriormente en un lahar (Tilling, 2005). Los lahares primarios pueden tener volúmenes desde los 10^7 a 10^9 m³, alcanzando velocidades de más de 20 m/s a cientos de m/s, viajando grandes distancias, a veces de cientos de kilómetros aguas abajo (Mothes & Vallance, 2015). Los lahares pueden tener altas temperaturas resultado de la movilización de material piroclástico aún caliente (Gudmundsson, 2015). A pesar de tener concentraciones de grano y densidad de masa comparables a las del suelo sólido, los lahares pueden moverse casi como líquidos, siempre y cuando el agua con partículas de tamaño limo-arcilla reduzcan la disipación de energía por fricción entre los granos más grandes, estas fuerza de lubricaciones locales se manifiestan por presiones de fluido que pueden causar licuefacción, sin embargo, esta fuerza disminuye a medida que el movimiento del lahar también disminuye y cesa (Vallance & Iverson, 2015).

Los principales controles físicos son la gravedad, la topografía, la proporción entre sólido y líquido, la distribución del tamaño de grano y el límite de fluencia (Martí, 2017).

Los lahares son a menudo eventos que amenazan la vida ya que pueden viajar muy rápido (varias decenas de kilómetros por hora), pueden ocupar canales y valles completos y tener alcances de decenas a cientos de kilómetros (Blong, 1984).

Los lahares pueden ocurrir sin mayor advertencia para aquellos que viven junto a los ríos en los flancos del volcán, especialmente aguas abajo, casos como lluvias intensas en las cumbres pueden remover fácilmente los depósitos de ceniza que luego fluyen rápidamente como corrientes de lodo recogiendo rocas y otros escombros en los caminos y provocando inundaciones repentinas en las comunidades expuestas. Tanto lahares primarios como secundarios provocan: (1) colmatación de canales de ríos o arroyos. (2) Entierro por las masas de lodo. (3) Colapso de edificios. (4) Muerte o lesiones graves en personas que son engullidas, golpeadas y cortadas contra objetos estacionarios o en movimiento dentro del lahar, o incluso muertas a causa de asfixia traumática. (5) El contacto con el lodo durante días puede causar enfermedades infecciosas como gangrena gaseosa, tétanos y fascitis necrotizante (Baxter & Horwell, 2015).

Los lahares pueden dificultar la evacuación de las personas por su capacidad de destruir rutas de transporte importantes por lo que el trabajo anticipado de las autoridades, científicos y la comunidad para profundizar en el conocimiento de la geografía local, los peligros y su zonificación, y la ubicación espacial de las comunidades respecto a esas zonas son fundamentales (Mothes & Vallance, 2015) puesto que la evacuación puede ser la única precaución segura frente a la amenaza continua de un volcán activo.

La preparación de la comunidad debe incluir consejos de últimos recursos para avanzar rápidamente a un terreno más alto si hay un lahar en curso, lo cual puede hacerse con una advertencia de una hora de anticipación, pero podría no ser suficiente para evacuar ancianos, enfermos y pacientes de hospitales (Baxter & Horwell, 2015). Las restricciones de construcción en las zonas de peligro de lahares suelen ser políticamente impopulares por lo cual, aparentemente, son medidas no tan viables, y el monitoreo de lahares implica todavía demasiada incertidumbre (Mothes & Vallance, 2015). Otras medidas de mitigación como la construcción de barreras de contención para lahares pequeños y el mantenimiento de refugios en terrenos altos al alcance de granjas y aldeas, demuestran reducir la vulnerabilidad de la comunidad (Baxter *et al.*, 1986).

2.2.5. Flujos de Lava

Las lavas son roca fundida o parcialmente fundida que entran en erupción sobre la superficie terrestre, las cuales están compuesta mayoritariamente de silicatos a temperaturas entre los 800 a los 1.200°C, cuyos flujos son corrientes de este material que desciende por los flancos del volcán lenta e inexorablemente extendiéndose hasta decenas de kilómetros y alcanzando espesores de cientos de metros (Kilburn, 2015). Los tipos de flujos de lava son *pahoehoe*, *aa* y bloques de lava; los primeros se caracterizan por sus costras rizadas, suaves u ondulantes de menos de un metro de espesor, los cuales se superponen uno sobre el otro y pueden extenderse por varios kilómetros, son de composición basáltica; los segundos son por lo general más gruesos (30 m de espesor) y se caracterizan por una superficie de escoria áspera y un interior de lava masiva; y los terceros son como los flujos *aa*, excepto que la superficie está compuesta de grandes bloques y se desarrollan mejor en lavas intermedias de composición silíceas, alcanzando cortas distancias (Blong, 1984). Los flujos de lava son generados comúnmente en erupciones no explosivas, cuya velocidad y alcance dependen de la topografía y su viscosidad, determinado a su vez por su temperatura, composición

química, contenido de gases y cristalinidad; además las tasas de velocidad de movimiento de los flujos influyen en que se generen los diversos tipos de morfologías de los flujos de lava (Tilling, 2005). Frecuentemente un mismo flujo puede evolucionar corriente abajo, por ejemplo, en lavas basálticas pueden ocurrir transiciones de tipo *pahoehoe* a *aa*; y en algunas andesitas basálticas de *aa* a bloques (Kilburn, 2015).

Algunas velocidades reportadas en erupciones histórica son entre 3 a 3.600 m/h (Blong, 1984). Debido a su alta viscosidad la lava puede reducir rápidamente la aceleración de su flujo, como resultado tienden avanzar a velocidades casi constantes y manteniendo un flujo laminar, cuyo crecimiento se controla mediante la forma en que la resistencia reológica de la lava es superada por la gravedad que tira pendiente abajo y por las diferencias de presión debido a las variedades locales del grosor del flujo (Kilburn, 2015).

Los flujos de lava son peligrosos debido a su calor extremo y su capacidad de rodear, enterrar y forzar fallas estructurales, así como también por una multitud de otros impactos, como: (1) muerte y lesiones en personas y animales, siendo causas principales la llegada inesperada de lava en una zona poblada, el acercamiento voluntario de turistas y la interacción de la lava con el agua o el combustible. (2) Colapso, enterramiento, ignición, elevación, transporte, falla y deformación en construcciones. (3) Impacto sobre las comunicaciones como carreteras, ferrocarriles, canales, ríos, puertos y aeropuertos cuando son invadidos por lavas, así como también sobre los suministros de agua, telecomunicaciones, gas, electricidad y maquinarias en general. (4) Impacto sobre la agricultura al ser incendiados o enterrados los cultivos por las lavas, reemplazando las tierras previamente fértiles por roca volcánica infértil. (5) Impacto sobre la actividad económica resultado de la destrucción de negocios y propiedades en general, así como también por los gastos de evacuación, medidas de mitigación, reubicación de población y limpieza. (6) Impactos sociales como la salud mental de los individuos, el desorden, saqueos y destrucción de la comunidad (Blong, 1984; Harris, 2015). Otros efectos secundarios del paso de las lavas son: (1) incendios forestales causados por el avance de lava en los bosques. (2) La generación de lahares causado por el avance de lava en la nieve y glaciares. (3) Explosiones por acumulación de metano debajo de los flujos de lava. (4) Su solidificación puede generar que las futuras lavas se desvíen para afectar nuevas zonas. (5) El bloqueo de valles que puede represar ríos o causar inundaciones. (6) Colapso del frente de flujo pueden generar flujos piroclásticos. (7) Efecto en la salud de personas y animales por el agua contaminada o calentada por las lavas, o por los vapores generados por lavas (Harris, 2015).

A pesar de que intuitivamente se puede pensar que los flujos más rápidos, más calientes, más móviles y menos viscosos son los más riesgosos, éstos son relativamente más delgados y se enfrían relativamente más rápido y, a su vez, son más fácil de desviar por irregularidades o infraestructura hecha por el hombre; los flujos menos calientes y más lentos aún tienen la capacidad de quemar por ignición y las velocidades de derrame aún pueden ser lo suficientemente altas, además son más gruesos y difíciles de desviar. Además, los bloques de lava tienen el impacto adicional de generar avalanchas de bloques (Blong, 1984).

Las medidas de control del crecimiento de flujos de lava son a través de la construcción de represas o barreras de desviación, la redirección de un flujo perforando sus márgenes a través de bombardeos aéreos o explosivos o la ralentización de su avance mediante enfriamiento artificial, siendo más efectivo una u otra medida dependiendo de la topografía y de las características intrínsecas del flujo de lava, por lo que lo que un conocimiento previo puede ayudar en la definición de estrategias más efectivas, desde intervenciones directa hasta la evacuación de las comunidades amenazadas (Kilburn, 2015).

2.3. Árboles Probabilísticos

Cuantificar la probabilidad de ocurrencia de los peligros volcánicos presenta dificultades, una es la *variabilidad aleatoria*, la cual consiste en que la complejidad intrínseca de los fenómenos volcánicos, es decir, la imposibilidad de predecir de manera determinística la evolución de un sistema volcánico conlleva a una estocasticidad irreductible en los resultados; otra es la *incertidumbre epistémica* asociada a las limitaciones del conocimiento, como la escasez de datos en el registro histórico (Connor *et al.*, 2015). Por un lado, las erupciones violentas son eventos raros, lo que implica que los datos son insuficientes para construir un confiable y robusto modelo estadístico, sin embargo, el riesgo extremo obliga a la resolución del problema desde el pragmatismo (Marzocchi *et al.*, 2004; 2006). Por el otro, la calidad de los registros se deteriora a medida que se retrocede en el tiempo, por lo que puede ser necesario considerar solo las erupciones más recientes o solo las erupciones de mayor magnitud (Newhall & Hoblitt, 2002).

En dicho contexto, si bien los resultados de las evaluaciones probabilísticas son cuantitativos, aún dependen del modelo y los supuestos de los datos, y dicha incertidumbre puede tener una profunda influencia en la evaluación del peligro (Connor *et al.*, 2015).

Una propuesta adecuada para la cuantificación de los diferentes escenarios eruptivos, que abarca un amplio rango de posibles fenómenos volcánicos y su incertidumbre inherente, son el uso de una estructuración ordenada de éstos (árboles probabilísticos) y un tratamiento probabilístico adecuado (bayesiano) lo cual podría permitir calcular, por ejemplo, la probabilidad de que un lahar se extienda por más de 10 km en el sector NE del volcán dentro de los siguientes 50 años (Connor *et al.*, 2015).

2.3.1. Estructuración

Newhall & Hoblitt (2002) definen *árbol probabilístico* como una representación gráfica en forma de árbol (Fig. 2.3) de eventos que son mutuamente excluyentes, cuyos nodos son pasos lógicos desde eventos generales hasta eventos progresivamente más específicos, mostrando todos los posibles resultados relevantes en una actividad volcánica. El producto multiplicativo de las probabilidades a lo largo de cualquier nodo será la probabilidad del evento más específico. Marzocchi *et al.* (2006). Sin embargo, especifica que los eventos no necesitan ser mutuamente excluyente, si se abarcan de manera independientes uno de los otros. Los árboles probabilísticos pueden ser aplicados para erupciones a largo (próximos años, décadas o siglos), mediano (próximos meses y, ocasionalmente, años) y corto plazo (próximos minutos a semanas).

La estimación de la probabilidad se basa, comúnmente, en: (1) la combinación de la historia eruptiva local, (2) comparaciones globales con volcanes análogos, (3) la integración con datos de monitoreo actuales y (4) la obtención de opinión de expertos (Wright *et al.*, 2018). La historia eruptiva es la principal fuente de información para los pronósticos a largo plazo, en cambio, el monitoreo puede ayudar con los pronósticos a corto y mediano plazo (Marzocchi *et al.*, 2004).

El principal atributo de los árboles probabilísticos consiste en su intrínseca simplicidad y su capacidad para proveer una estimación probabilística cuantitativa de cada tipo de peligro volcánico y riesgo individual, agregando un valor de pronóstico a los escenarios eruptivos específicos a largo plazo en que se basan la mayoría de los mapas elaborados (Marzocchi *et al.*, 2004).

Los árboles probabilísticos también pueden utilizar la lógica bayesiana para combinar información previa proveniente de expertos, modelos y datos de la actividad pasada, lo cual permite, por un lado, configurar el tratamiento de cada nodo, de modo que calcule la probabilidad considerando los modelos y luego los datos del registro histórico y, por el otro, permite que cada probabilidad

no solo represente un valor discreto, sino una distribución de valores, lo cual permite una mejor comunicación de la incertidumbre (Connor *et al.*, 2015).

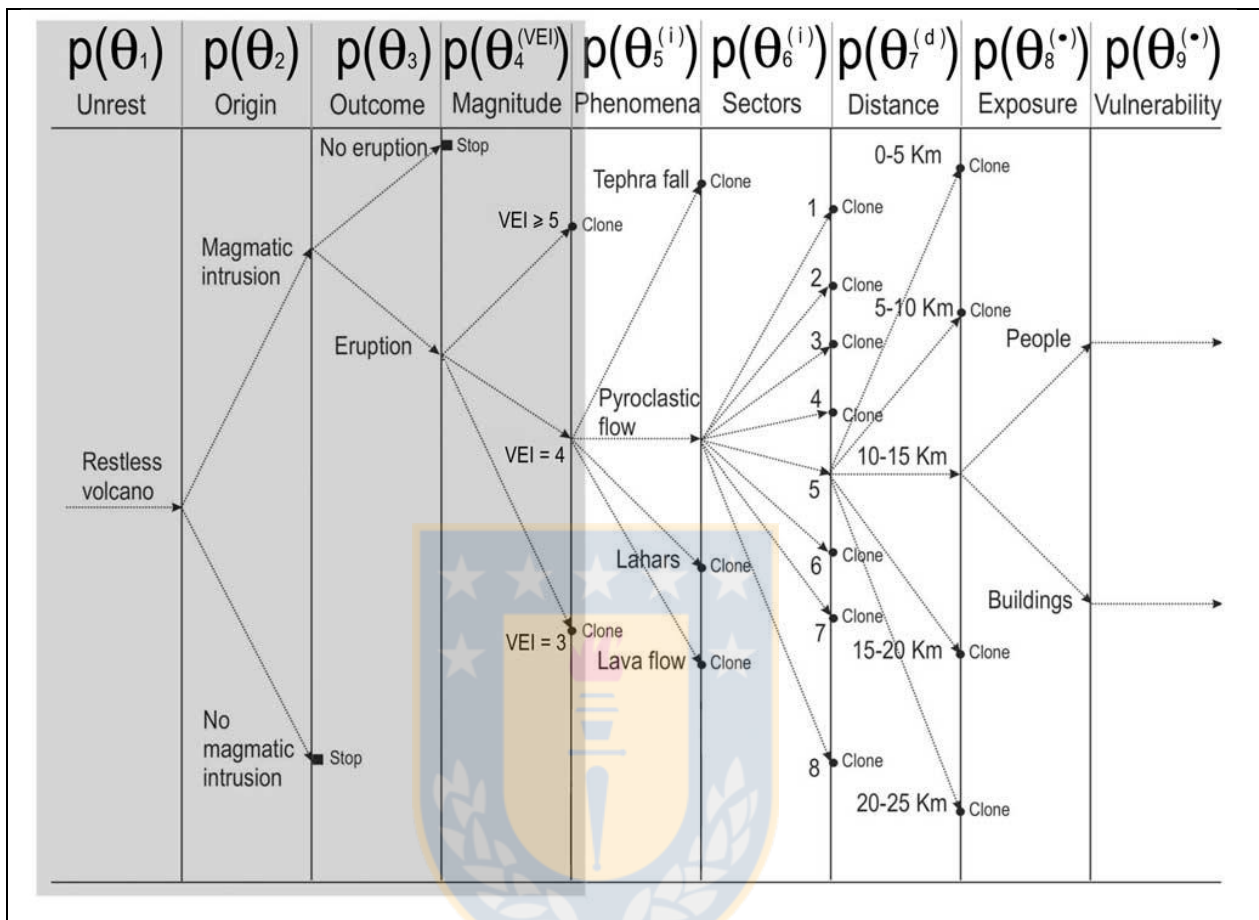


Figura 2.3: Esquema de un árbol de eventos del Monte Vesubio. Cada columna representa un nodo donde se ramifican todos los resultados posibles de una actividad volcánica, por ejemplo, un nodo más general $p(\theta_4^{VEI})$, definido como magnitud (VEI= 3, 4, 5, etc.), se divide en nodos más específicos $p(\theta_5^i)$, definidos como *fenómenos* (flujo de lava, lahars, flujo piroclástico, caída de tefra). *Stop* es donde se termina una rama específica del árbol y *clone* es la repetición de las ramas de un nodo específico en los otros nodos. Obtenido de Marzocchi *et al.* (2004).

2.3.2. Tratamiento Probabilístico

Para el tratamiento probabilístico Newhall y Hoblitt (2002) proponen el *teorema de Bayes*, quienes utilizan la siguiente expresión matemática para el cálculo de probabilidades para cada nodo y rama condicionada:

$$p(n|n-1) = \frac{p(n-1|n) * p(n)}{p(n-1|n) * p(n) + p(n-1|n') * p(n')}$$

Siendo $p(n|n - 1)$ la probabilidad del evento n , dado que el evento anterior $n-1$ ha ocurrido.

Siendo $p(n - 1|n)$ la probabilidad del evento $n-1$, dado que el evento siguiente n ocurre.

Siendo $p(n)$ la probabilidad que ocurra el evento n .

Siendo $p(n - 1|n')$ la probabilidad del evento $n-1$, dado que el evento siguiente n no ocurre.

Siendo, finalmente, $p(n')$ la probabilidad que no ocurra el evento n .

La probabilidad de cualquier evento $p(n)$ es el producto de la probabilidad de un evento inicial $p(1)$ y todas las demás probabilidades condicionales:

$$p(n) = p(1) * p(2|1) * p(3|2) * \dots * p(n|n - 1)$$

Por otro lado, Marzocchi *et al.* (2004) proponen el uso de una distribución en lugar de un solo valor para la probabilidad, lo cual permite tener en cuenta formalmente, tanto la variabilidad aleatoria, estimada a través de un promedio de la distribución, como la incertidumbre epistémica, estimada a través de la dispersión de la distribución *beta*. Se recomienda el uso de la distribución *beta*, porque las variables aleatorias resultan en un rango $[0,1]$, es unimodal y además es la más utilizada, sin embargo, se pueden ocupar otras distribuciones razonables, porque las diferencias asociadas no suelen ser significativas.

$$[\theta] = \text{Beta}(\alpha, \beta) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha) * \Gamma(\beta)} \theta^{\alpha-1} (1 - \theta)^{\beta-1}$$

Siendo $[\theta]$ la función de densidad probabilística.

Siendo $\Gamma(*)$ la función gamma.

Y siendo α y β parámetros con valores positivos que dan forma a la distribución.

El promedio y la variancia son, respectivamente:

$$E(\theta) = \frac{\alpha}{\alpha + \beta}$$

$$V(\theta) = \frac{\alpha * \beta}{(\alpha + \beta)^2 * (\alpha + \beta + 1)} = \frac{E(\theta) * (1 - E(\theta))}{\alpha + \beta + 1}$$

Para dar paso de una distribución anterior a una posterior, por ejemplo, se realiza a través del siguiente método:

$$[\theta|Y] = \text{Beta}(\alpha_{post}, \beta_{post}) = \text{Beta}(\alpha_{prior} + y, \beta_{prior} + n - y)$$

Siendo $[Y]$ un set de datos de la actividad pasada con n datos en total e y ocurrencias.

Se puede expresar la máxima ignorancia de la distribución con $\alpha_{prior} = \beta_{prior} = 1$, de modo contrario se puede estimar utilizando la probabilidad condicional $p(n|n-1) = E(\theta)$ y estimar luego la dispersión alrededor del valor central con la siguiente ecuación:

$$V(\theta) = \frac{E(\theta) * (1 - E(\theta))}{\Lambda + 2}$$

Siendo $\Lambda = \alpha + \beta - 1$ interpretada como el número de datos equivalentes que equivale al grado o cantidad de información contenida previamente. Λ es un valor subjetivo que mientras mayor es su valor, mayor es el grado de confianza en la exactitud y precisión de la información utilizada para establecer la distribución. Se considera que un valor discreto de probabilidad es una opción mucho más subjetiva que cualquier otra distribución (Connor *et al.*, 2015).

2.3.3. Aplicaciones de Árboles Probabilísticos

Marzocchi *et al.* (2008) desarrollan una herramienta llamada BET_EF para pronósticos de erupciones utilizando árboles de eventos con inferencia bayesiana y Sandri *et al.* (2009) lo aplican para pronósticos de erupciones sobre el volcán Vesubio simulando la etapa previa a la erupción de 1631, de lo cual se destaca: (1) la importancia de los datos históricos para estudiar y modelar erupciones anteriores, especialmente si no se cuenta con registros recientes o sistemas de monitoreo. (2) La posibilidad de rastrear el tiempo marcando pasos en la probabilidad de erupción a medida que el tiempo se aproxima al inicio de la erupción. (3) Este tipo de proximidad en el tiempo puede ayudar a la toma de decisiones sobre la evacuación. (4) Incluso la incertidumbre aleatoria se condiciona a la realidad actual de los volcanólogos horas antes de una erupción. (5) Por lo tanto, la simulación del pronóstico usando BET_EF fue exitoso para la erupción de 1631 del volcán Vesubio detectando cada actividad previa a la erupción con dos meses de antelación. Esta herramienta también es desarrollada con el nombre de BET_VH, la cual permite la visualización de los resultados en un mapa y es aplicada en la caldera Campi Flegrei (Marzocchi *et al.*, 2010).

Sobradelo & Martí (2010) añaden a los modelos de árboles probabilísticos el efecto que tienen los detonadores externos, como los de origen geotérmicos o sísmicos y añaden el efecto que pueden

tener diferentes tipos de composición magmática y ubicaciones de la fuente de origen, aplicándolo todo esto sobre el volcán Teide-Pico Viejo. Este estudio logra explicar de manera más detallada y completa el comportamiento del volcán que, además, presenta otros desafíos como la ausencia de datos históricos y datos geológicos limitados. Esto se realiza a través del diseño de extensas redes bayesianas con la estimación a largo plazo de cada escenario y un fuerte control de las incertidumbres epistémicas y aleatorias, lo que permite, a la vez, su actualización a medida que nuevos datos sean reunidos.

Sobradelo *et al.* (2014) desarrollan una herramienta (HASSET) construida en base a la estructura de árboles de evento utilizando la inferencia bayesiana para estimar la probabilidad, el cual permite comparar los posibles futuros escenarios eruptivos y evaluar las fuentes de incertidumbre más relevantes, incluyendo aquellos episodios de activación que no llegan a la erupción pero que tienen riesgos asociados (como colapsos sectoriales y explosiones freáticas).

Tonini *et al.* (2015) desarrollan una herramienta de código abierto y multiplataforma de árbol de eventos bayesianos para riesgo volcánico (PyBetVH), el cual sirve para estimar la probabilidad de que ocurra cualquier fenómeno de peligro volcánico en un periodo de tiempo, incluyéndose las incertidumbres asociadas, y tiene la capacidad de calcular curvas de peligro y distribución de probabilidad en función de la intensidad, aplicable a cualquier volcán.

Wright *et al.* (2018) aplican los árboles probabilísticos para pronosticar la probabilidad de eventos del volcán Sinabung en tiempo real, el cual presentó erupciones que han variado de freáticas, a freatomagmáticas, hasta magmáticas explosivas, todos resaltados previamente como escenarios más probables. Incluso se pronostica la ocurrencia de pronósticos de escenarios menos probables, pero de alto impacto. Ninguno de los árboles probabilísticos precedió un cambio en el nivel de alerta, pero aclaró la comprensión actual del sistema magmático, destacando posibles cambios importantes en los parámetros de monitoreo y permitió una retroalimentación para mejorar su aplicación.

Finalmente, Newhall & Pallister (2015) reportan un listado de volcanes en los cuales se han aplicado modelos de árboles probabilísticos, los cuales son: Mount St. Helen, Pinatubo, Popocatépetl, Soufrière Hills, Tungurahua, Guagua Pichincha, Nyiragongo, Pago, Garbuna, Merapi, Huila, Chaitén, Harrat Lunayyir, Mayon, Nevado de Ruiz, Sinabung, Arenal, Auckland, Campi Legrei, Chiltepe-Apoyo, Colima, El Misti, Etna, Miyake-jima, Ruapehu, Sete Cidades,

Soufrière Guadeloupe, Soputan, Teide-Pico Viejo y Vesubio. Lo que muestra la importancia que tienen los modelos de árboles probabilísticos para los pronósticos de erupciones para volcanólogos de todo el mundo.

2.4. Comunicación de los Peligros Volcánicos

El concepto *mapa simplificado* surge de la necesidad de conseguir una comunicación efectiva de la información sobre los peligros volcánicos por medio de los mapas, es un concepto informal que implica la confección de mapas orientados hacia los usuarios no especializados, que sean eficaces, es decir, que transmitan la información correcta, y eficientes, es decir que la transmisión de información sea rápida y clara.

Thompson *et al.* (2018) señalan que las elecciones acerca del diseño de los mapas de peligro y las características intrínsecas de los usuarios influyen en cómo las personas entienden los mapas de peligro y qué decisiones van a tomar en caso de una crisis volcánica, por lo tanto, considerar estos factores para diseñar los mapas de peligro de manera que sean accesibles, relevantes y claros para las personas que lo usan, proporcionando una buena comunicación.

La teoría de la cognición visual explica como las representaciones visuales externas (por ejemplo, un mapa) influyen en las representaciones cognitivas internas (el usuario) a través de cuatro procesos: (1) la imagen entrega un estímulo visual detectado por la retina, (2) desde ese estímulo el cerebro percibe lo que es visto, (3) los procesos cognitivos forman el significado derivado de lo que es visto y (4) los conocimientos previos influyen en lo que es visto y el significado derivado (Pinker, 1990 *in* Severtson & Vatovec, 2012). Por lo tanto, se considera que una variabilidad en alguno de estos procesos explica las discrepancias que pueden existir entre el significado intencionado del “*emisor*” y el significado interpretado del “*receptor*” en una representación visual.

En los siguientes subcapítulos son tratados los resultados empíricos de investigaciones anteriores asociadas a la cognición visual sobre mapas de peligro volcánico (u otros mapas en general) como representaciones gráficas, a modo de obtener un marco de cuáles son las características visuales de los *diseños de los mapas de peligro* que permiten una mejor usabilidad de estos y cuáles son las *características intrínsecas de los usuarios* que influyen en cómo son leídos e interpretados los mapas.

2.4.1. Diseño de los Mapas de Peligro

Duchowski (2017) señala que la motivación de mover los ojos a una parte particular del campo de visión es tener una observación en detalle de aquello que está en la dirección central de la mirada, por lo que supone que rastrear los movimientos de los ojos de alguien es conocer su *atención visual*, el cual es un proceso cognitivo (visual) interno que implica la selección de la información visual para que la mente pueda procesar con éxito el estímulo de interés, es decir, un indicador de cómo aquella persona percibió la escena que estaba mirando.

Además, realiza una revisión histórica de los estudios realizados acerca la atención visual, de lo cual concluye que los modismos singulares que describen la naturaleza selectiva de la percepción visual son el “*dónde*” y el “*qué*”, el primero corresponde a la selección visual de las regiones específicas de interés de todo el campo visual de la visión periférica y, el segundo, corresponde a la inspección detallada de la región espacial a través de un canal perceptivo limitado en extensión espacial. Esta teoría explica como los estímulos visuales del gráfico son percibidos por el cerebro del usuario, además de cimentar una base para los estudios de seguimiento ocular y sus análisis que interpretan la atención visual.

Por otro lado, los factores primarios que influyen en lo que es visto son: (1) la *locación espacial*, definida por las *unidades de percepción*, las cuales se entienden como la forma en que se presenta la información, por ejemplo, la información de peligro representada como puntos discretos o áreas con información estadística integrada. (2) Las *leyes de Gestalt*, las cuales explican cómo los atributos de proximidad, semejanza y continuidad integran las características tales como líneas y colores para crear una entidad coherente. (3) La *magnitud* la cual hace referencia a dimensiones cuantificables como la gradación de color y tamaño. (4) El *sistema de coordenada* la cual es definida como la localización de las unidades de percepción, por ejemplo, la latitud y longitud en el caso de los mapas (Pinker, 1990 in Severtson & Vatovec, 2012; Wertheimer, 1938 in Severtson & Vatovec, 2012).

Luego, los procesos cognitivos que influyen en el cómo la información visual se comprende consciente o inconscientemente son: los procesamientos *top-down*, controlados por los objetivos definidos por el usuario y los procesamientos *bottom-up*, controlados por la entrada sensorial visual (Swienty *et al.*, 2008). Este último tipo de procesamiento se relaciona con que el “*ver*” está literalmente vinculado con el “*saber*” y su adecuado uso mejora la comprensión del usuario al

liberar su memoria a corto plazo para otras necesidades de procesamiento, por ejemplo, las *características preatentivas* comprendidas a través de los procesamientos *bottom-up* (que pueden ser longitud, dirección, ángulo, área, volumen, sombreado, etc.), los cuales pueden mejorar la comprensión significativa del usuario (Severtson & Vatovec, 2012). Por otra parte, los *símbolos visuales* son representaciones de cosas o ideas (DeLoach, 1995 *in* Severtson & Vatovec, 2012). Severtson & Vatovec (2012) concluyeron, de modo general, que las características preatentivas y simbólicas cuidadosamente seleccionadas (detalles en los subcapítulos siguientes) pueden fomentar una idea precisa, incluso cuando los detalles son poco conocidos.

Finalmente, Swienty *et al.* (2008) evalúan diseños visuales de mapas utilizando una metodología orientada a la atención mediante el uso de la tecnología de seguimiento ocular. Dicha metodología consiste en utilizar el criterio de simplicidad (reducir la complejidad visual), jerarquía (organizar y estructurar la información en capas visuales) y concisión (destacar la información importante utilizando la saliencia visual) en la elaboración de los mapas, concluyendo que dicha metodología resulta efectiva para la realización de tareas específicas por parte de los usuarios. La *saliencia visual* es la cualidad perceptiva distintiva que hace que algunos elementos se destaquen de sus vecinos y atraigan la atención de las personas (Itti, 2007 *in* Severtson & Vatovec, 2012).

2.4.1.1. Unidades de Percepción

Haynes *et al.* (2007) evalúan la efectividad a través de encuestas a los usuarios entre un mapa de contorno, un modelo de elevación digital y una fotografía aérea (Fig. 2.4), los cuales pueden considerarse diferentes formas de representar información topográfica. De su investigación concluyen que en cuanto a los ejercicios de orientación ningún mapa resulta especialmente más efectivo, sin embargo, la fotografía aérea es el formato más efectivo para localizar elementos como pueblos, valles y colinas. Finalmente, concluyen que la identificación de las áreas de exclusión fue bastante efectiva en todos los mapas, pero al momento de interpretar los motivos de porque existe dicha área y su relación con la topografía no lo es.

Nave *et al.* (2010) evalúan también la efectividad entre un mapa de contorno, una fotografía aérea blanco y negro, un mapa sombreado y un modelo de elevación digital, esta vez a través de entrevistas. Concluyen, en cambio, que el modelo de elevación digital mejora la comprensión de la relación espacial entre el terreno y los peligros, especialmente para los usuarios no especializados.

Concluyen, además, que los mapas concisos con gráficos simples y topografía precisa son herramientas efectivas para una variedad de propósitos.

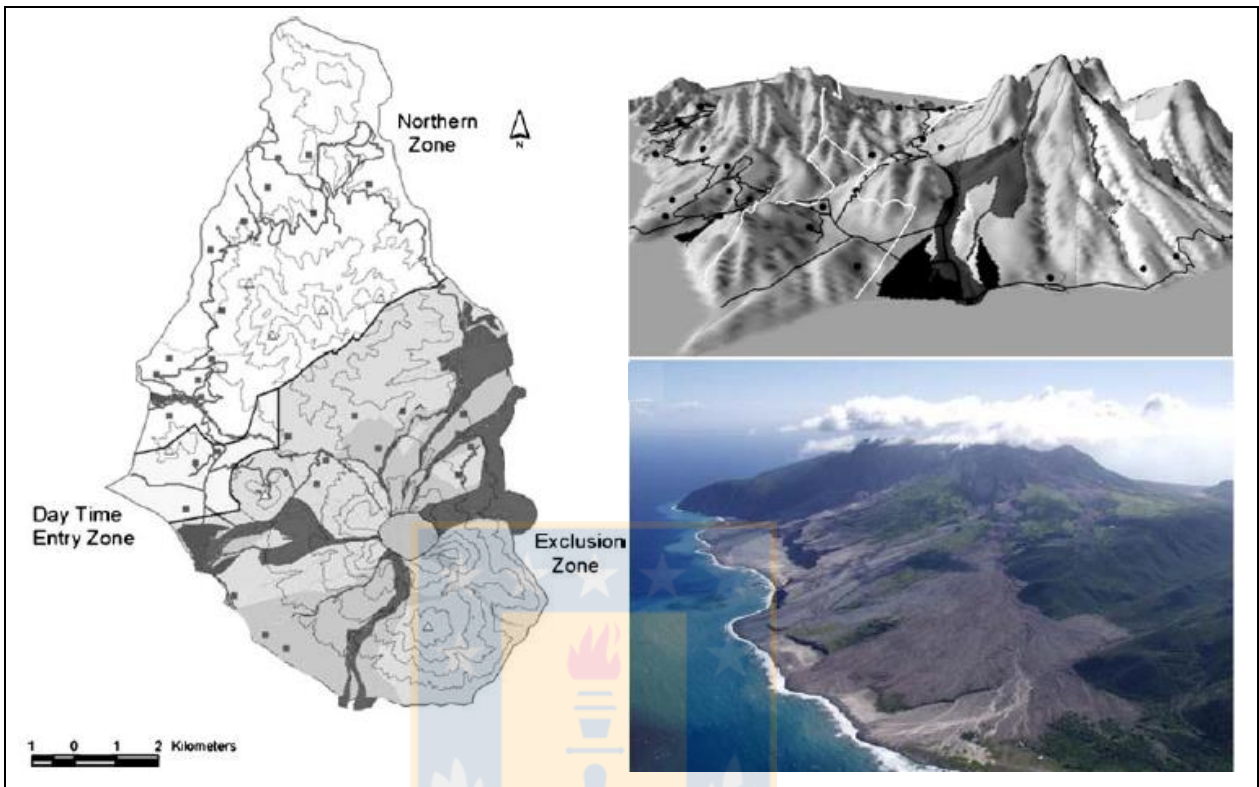


Figura 2.4: Mapas de contorno, modelo de elevación digital y fotografía aérea. El mapa de contorno a la derecha, el modelo de elevación digital arriba a la izquierda y la fotografía aérea abajo a la izquierda. Obtenido de Haynes *et al.* (2007).

Por otro lado, Severtson & Vatovec (2012) evalúan la representación de la información de pozos contaminados en un mapa de puntos discretos y otro coroplético (Fig. 2.5) de lo cual concluyen que los mapas de puntos discretos, que son una representación gráfica compleja con muchos objetos similares, requieren más tiempo de procesamiento cognitivo puesto que la atención está más distribuida y menos enfocada (Yantis, 2005 *in* Severtson & Vatovec, 2012) y fueron visto como un contador y localizador de pozos, en cambio, los mapas coropléticos, que resumen la información en grandes áreas, fueron visto como “*la presencia de un problema*”. Concluyen, posteriormente, que las unidades de percepción influyen en el enfoque en que los usuarios se plantean para comprender los diferentes formatos y en las tendencias que son observadas dentro del mapa, posiblemente, condicionadas a las *leyes de Gestalt*.

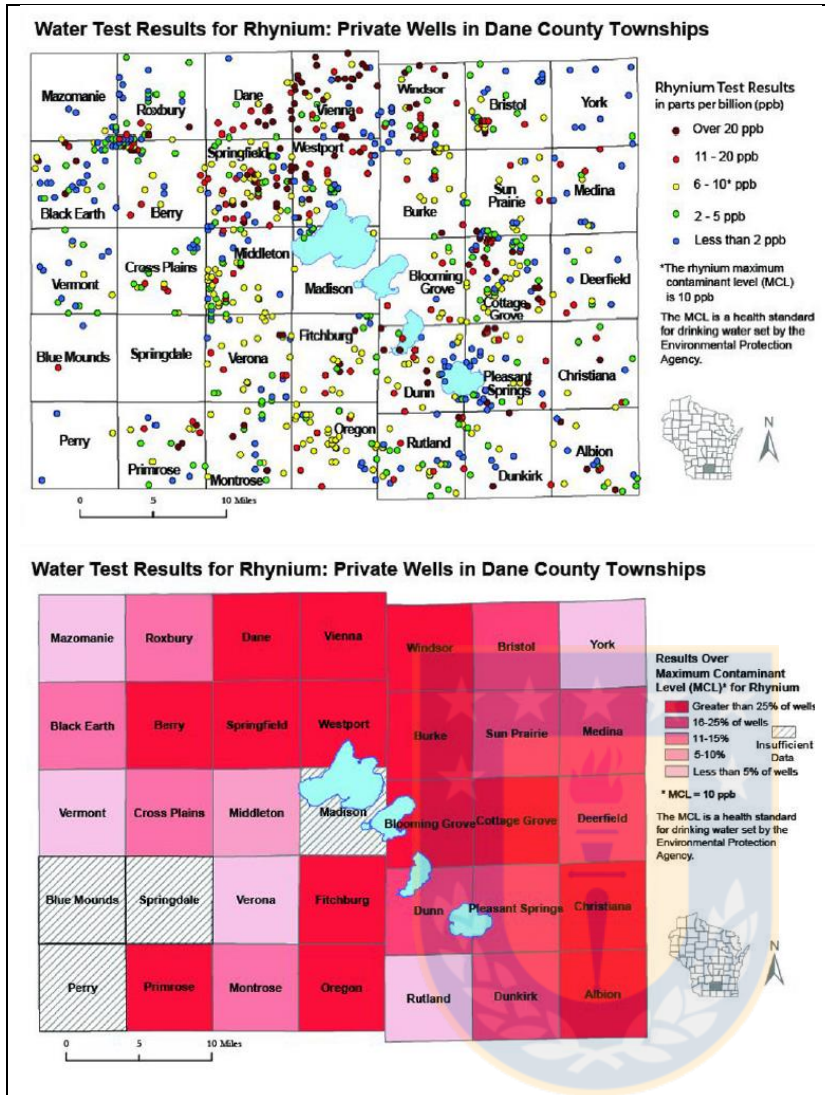


Figura 2.5: Mapas de puntos discretos y coroplético. Arriba se muestra el mapa de puntos discretos y abajo el mapa coroplético. Obtenido de Severtson & Vatovec (2012).

Preppernau & Jenny (2015) evalúan a través de encuestas la representación de la información del tiempo de llegada de lahares mediante el uso de un mapa de puntos discretos y otro de isócronas (Fig. 2.6), de lo cual concluyen que, en general, los tiempos de llegada de lahares comunican efectivamente su velocidad, aunque el uso de isócronas fue más efectivo que el uso de puntos discretos para comunicar los tiempos de llegada de lahares, y que los tiempos de llegada de lahares expresados en rangos de tiempo en vez de valores discretos aumenta la credibilidad percibida por los usuarios.

Finalmente, Thompson *et al.* (2015) evalúan las características visuales concretas de diversos mapas de peligro de caída de ceniza (Fig. 2.7) a través de entrevistas y cuestionarios, de lo cual concluyen que el mapa más efectivo para transmitir la naturaleza gradual del peligro de caída de

ceniza es el secuencial gradual con isopletas con intervalos cada 10%., además, recomiendan el uso de expresiones porcentuales y naturales a la vez (ejemplo: 10% y 1 es a 10) en vez de utilizar expresiones como “alto”, “medio” y “bajo”, los cuales resultan ambiguos.

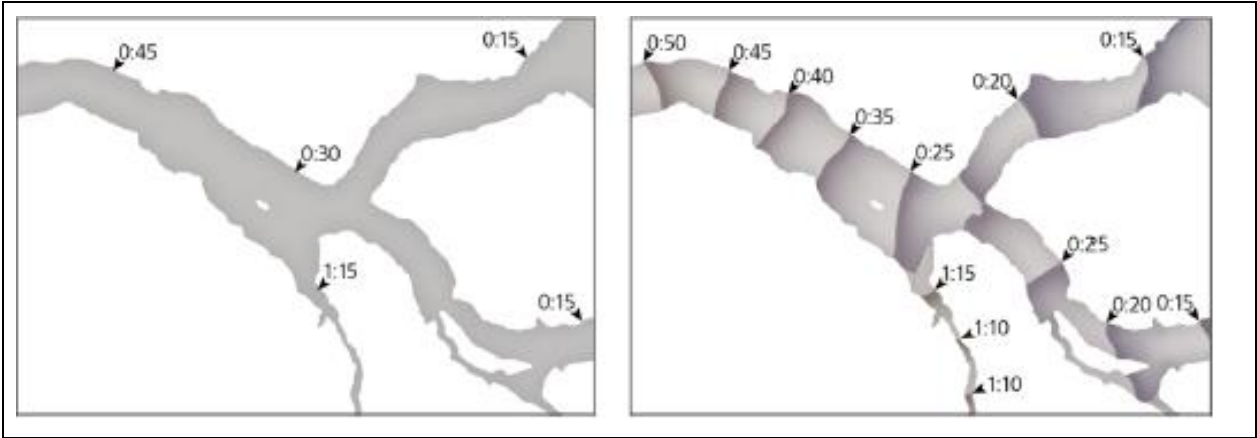


Figura 2.6: Diversos mapas que representan tiempos de llegada de lahares. A la izquierda el mapa con los puntos discretos y a la derecha con las isócronas. Obtenido de Preppernau & Jenny (2015).

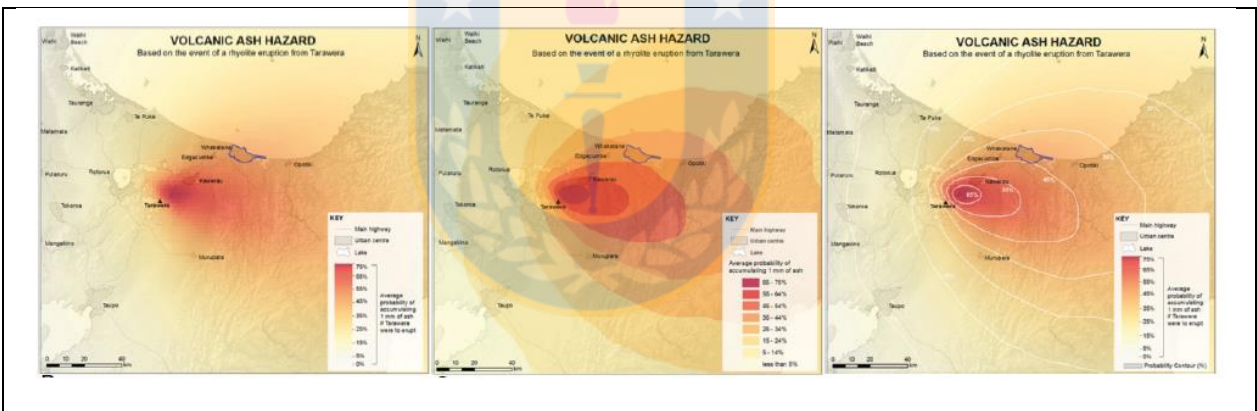


Figura 2.7: Diversos diseños de mapas de peligro de caída de ceniza volcánica. A la izquierda un mapa sombreado secuencial gradual, al medio un mapa sombreado secuencial segmentado y la derecha un mapa sombreado secuencial con isopletas con intervalos cada 10%. Obtenido de Thompson *et al.* (2015).

2.4.1.2. Proyección de los Mapas

Se pueden considerar las proyecciones de los mapas, tanto en su versión 2D como 3D, diferentes formas de representar la topografía, es decir, considerarse como unidades perceptivas, sin embargo, existen una cantidad de investigaciones que se enfocan única e íntegramente en la evaluación entre la efectividad entre una proyección y la otra. Por otro lado, la topografía interactúa con diferentes

elementos del mapa generándose una mayor complejidad en lo que respecta al análisis de características visuales, por lo que este tema es tratado de manera independiente.

En primer lugar, Wiebe *et al.* (2005) evalúan utilizando tecnología de seguimiento ocular tanto un mapa 2D, como un mapa 3D, tanto para tareas focalizadas (ejemplo: altura de punto), como tareas de integración (ejemplo: en caso de un flujo de detritos, ¿afectaría el punto A o B?) de lo cual se desprende que no existe mucha diferencia entre la efectividad de los mapas 2D y 3D, sin embargo, entre las preguntas focalizadas y de integración sí hubo diferencias., Además, concluyen que resolver tareas que involucran diversos tipo de elementos del mapa en un gran área representa mayor dificultad para los usuarios no experimentados.

Por otro lado, Petrovic & Masera (2006) concluyen que tanto los mapas 2D, como 3D, presentan una buena efectividad para mediciones de altura, orientación e interpretación de rutas, sin embargo, para mediciones de distancias los mapas 2D resultan mucho más efectivo que los otros.

Schobesberger & Patterson (2008) en su propia evaluación de efectividad entre mapas 2D y 3D concluyen, en cambio, que las mediciones de distancias, de la interpretación de la topografía, del ambiente y de los senderos son mejor comprendidos en los mapas 3D. Solo para ubicar localizaciones concretas resulta más efectivo el mapa 2D.

Savage *et al.* (2014) evalúan la efectividad tanto en precisión, como en tiempo, para tareas que no involucran utilizar la elevación entre un mapa 2D y un mapa 3D, a través de cuestionarios, de lo cual concluyen, en la misma línea que los anteriores trabajos, que para las tareas de ubicación y mediciones de distancias fue más efectivo los mapas 2D, incluso cuando se añadieron marcas y mallas en los mapas 3D.

Preppernau & Jenny (2015) evalúan también la efectividad, a través de encuestas, de un mapa 2D sombreado con tinte hipsométrico y un mapa 3D con ortofoto (Fig. 2.8), de lo cual concluyen que la interpretación del terreno, su relación con aquellos peligros que son controlados por la topografía, y la selección de rutas de evacuación, fueron más efectivos en los mapas 3D con ortofoto, sin embargo, para localizar ubicaciones la perspectiva tridimensional fue irrelevante.

Finalmente, Jenny *et al.* (2010) recomiendan la proyección progresiva para reducir el problema que tienen los mapas 3D de ocultar información de los sitios bajos, al reducir la oclusión, permite ganar profundidad en la visualización de los mapas y utilizar un ángulo de visión plano para llamar la atención del usuario hacia ciertos elementos dentro del paisaje. La proyección progresiva permite

generar mapas con una perspectiva que muestra las áreas que están más cercanas al observador como si se mirasen de arriba hacia abajo y cambia progresivamente el ángulo mostrando las áreas más lejanas como si se mirasen al horizonte, muy similar a como percibe el ojo humano en un sobrevuelo de avión.

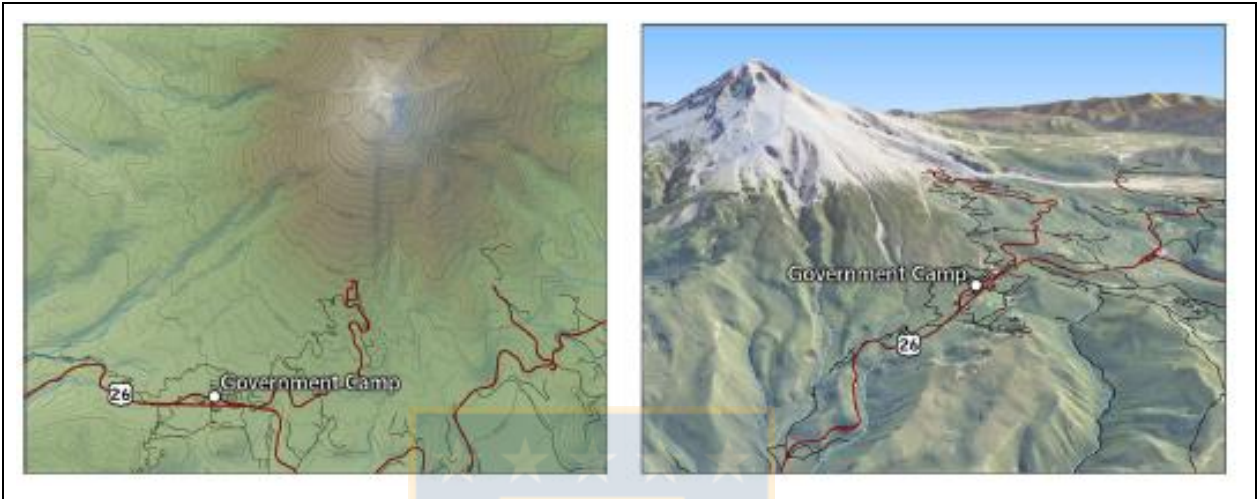


Figura 2.8: Mapa 2D sombreado con tinte hipsométrico y mapa 3D con ortofoto. A la izquierda el mapa 2D con tinte hipsométrico y la derecha el mapa 3D con ortofoto. Obtenido de Preppernau & Jenny (2015).

2.4.1.3. Color y Esquemas de Color

Haynes *et al.* (2007) observan que los colores utilizados en los mapas pueden ser interpretados *literalmente* como características físicas de los fenómenos volcánicos, como por ejemplo el rojo asociado a lavas o temperaturas altas, o el gris como el color de la ceniza de los flujos piroclásticos, por lo que se debe cuidar su uso, y, Nave *et al.* (2010) observan que la coloración de los mapas hace mucho menos confuso su uso en comparación con mapas en blanco y negro.

Severtson & Vatovec (2012) complementan esta idea al observar que el correcto uso de los colores disminuye el tiempo y la necesidad de leer el texto de apoyo, por ejemplo, el rojo es interpretado como una señal de advertencia y el amarillo como una señal de precaución, por otro lado, el azul y el verde son interpretados como colores relacionados con la seguridad. Sin embargo, otros colores pueden dificultar la interpretación del significado intencionado al ser más ambiguos, por ejemplo, el uso del rojo oscuro como “*alto peligro*” puede ser visto como marrón y presenta una saliencia visual menor que el rojo y puede resultar confuso para los usuarios, por otro lado, el uso del fucsia como “*alto peligro*” tampoco funciona, porque este color puede ser interpretado como algo benigno.

Finalmente, concluyen que los esquemas de color que gradúan su brillo o saturación pueden representar correctamente la magnitud de los datos, siendo los esquemas secuenciales un representante de magnitud incremental, y los esquemas divergentes son apropiados para datos con un punto medio significativo, como algún estándar de seguridad.

Thompson *et al.* (2015) evalúan diversos esquemas de color en mapas de peligro de caída de ceniza volcánica (Fig. 2.9), de lo cual observan que los esquemas secuenciales de color rojo-amarillo son comúnmente asociados a peligros y volcanes, además reducen la posibilidad de confusión con peligros hidrológicos y comunican bien que las áreas de bajo peligro tienen aún algún grado de peligro presente. Por otro lado, los esquemas de color divergentes pueden generar confusiones no deseadas, pero pueden ayudar en la toma de decisiones basado en la transición de tonos, por ejemplo, entre áreas seguras y no seguras. Posteriormente, recomiendan el uso de colores testeados y seguros para daltónicos.

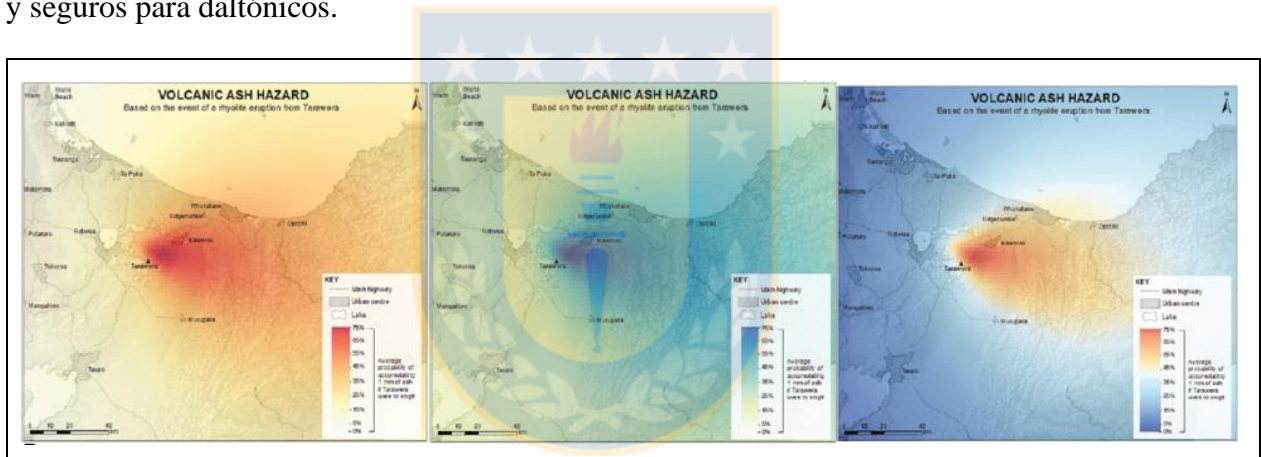


Figura 2.9: Diversos coloreados en mapas de peligro de caída de ceniza volcánica. A la izquierda un mapa de colores secuenciales rojo-amarillo, al medio un mapa de colores secuenciales azul-verde y a la derecha un mapa de colores divergentes rojo-amarillo y azul. Obtenido de Thompson *et al.* (2015).

Finalmente, Harrower *et al.* (2003) ofrecen una herramienta en línea llamado *ColorBrewer* que ayuda a los usuarios a elegir y crear esquemas de color tanto secuenciales, divergentes, como cualitativos. Permite escoger la cantidad de clases entre 3 a 12 para cada esquema y escoger, además, que sean aptas para impresión y fotocopias. Una característica interesante es que permite escoger colores aptos para personas con daltonismo.

2.4.1.4. Simbología

Petrovic & Masera (2006) evalúan diversos mapas observando que, para localizar edificios, iglesias, caminos, ríos, bosques y rocas, tanto un mapa 2D topográfico, como un mapa 3D con representaciones simbólicas son efectivos, sin embargo, señalan que el mapa 2D topográfico era previamente conocido por los usuarios, por lo tanto, las representaciones simbólicas muestran una mejoría en la efectividad para tareas de localización, que sus contrapartes no conocidas previamente no poseen.

Haynes *et al.* (2007), en cambio, observan que tanto los modelos de elevación digital, como las fotografías aéreas resultan muy efectivas en la interpretación topográfica y del comportamiento de los fenómenos volcánicos, esto puede deberse a que, en comparación de los mapas de contorno, los usuarios debieron interpretar menos simbologías asociadas. Destacan, además, la importancia de escoger una simbología fuertemente distintiva entre los diferentes elementos lineales. Nave *et al.* (2010), por su parte, destacan la utilidad que presenta integrar visualmente los peligros con los senderos y símbolos de localización para los administradores de emergencia.

Finalmente, Severtson & Vatovec (2012) observan que los símbolos fácilmente reconocibles disminuyen la carga de memoria a corto plazo y aumentan la comprensión, porque el significado es fácilmente accesible desde la memoria a largo plazo.

2.4.2. Características Intrínsecas de los Usuarios

En primer lugar, Hegarty *et al.* (2010) realizan una evaluación sobre los efectos del diseño visual de los mapas y el conocimiento de los usuarios en el uso de mapas, en que las características visuales relevantes para cierta tarea tenían más o menos saliencia visual (Fig. 2.10). Esto mediante el uso de tecnología de seguimiento ocular. Concluyen que el rendimiento mejora efectivamente cuando la saliencia visual existe, sin embargo, este efecto solo fue distinguible cuando los participantes habían adquiridos previamente los conocimientos necesarios para realizar las tareas.

Por su parte, Severtson & Vatovec (2012) realizan un marco que abarca cuales son los factores que influyen en las creencias de riesgo y en los comportamientos de protección de lo cual los puntos más importantes son: (1) el conocimiento previo influye substancialmente en el aprendizaje a partir de mapas (Verdi & Kulhavy, 2002 *in* Severtson & Vatovec, 2012), pero a pesar de la importancia

del conocimiento, las percepciones y creencias son mejores predictores de comportamiento en general (*National Cancer Institute, 2005 in Severtson & Vatovec, 2012*). (2) Antes que una persona tome medidas de autoprotección debe identificar la existencia de un riesgo y sus consecuencias para la salud (*Weinstein, 1988 in Severtson & Vatovec, 2012*). (3) La información concreta influye mayormente en las creencias y el comportamiento que la información abstracta. (4) Las personas buscan abstraer la esencia global de la información en lugar de los detalles precisos y prefieren tomar decisiones basadas en lo práctico, por otro lado, la memoria acerca de los detalles suele desvanecerse, mientras que la esencia significativa se incorpora en las representaciones duraderas (*Rivers et al., 2008 in Severtson & Vatovec, 2012*). (5) La relevancia personal tiene influencia en la atención. (6) Finalmente, la proximidad representada en los mapas de peligro tiene influencia en la creencia de riesgo.

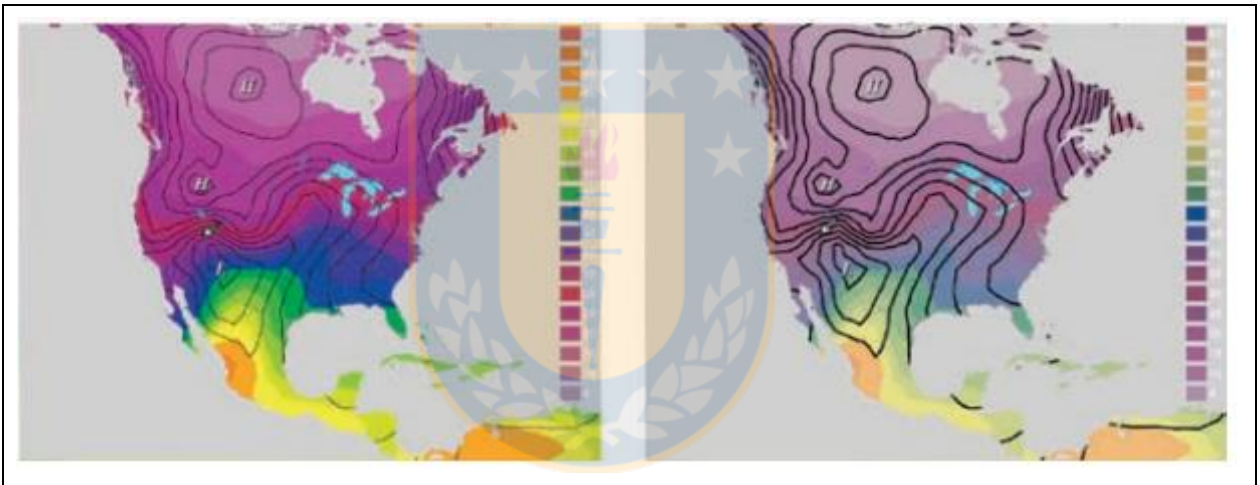


Figura 2.10: Mapa de presión y temperatura con diferentes saliencias visuales. La presión está representada por las isolíneas y la temperatura por los coropletas. El mapa de la izquierda la saliencia está sobre la temperatura (irrelevante para la tarea) y el mapa de la derecha la saliencia está sobre la presión (relevante para la tarea). Obtenido de *Hegarty et al. (2010)*.

Retchless (2014) examina cómo influye la experiencia y la confianza hacia los expertos en la percepción de riesgos de los usuarios. Los usuarios novicios que examinan los mapas de peligro suelen subestimar las incertidumbres asociadas a los peligros y si los usuarios tienen confianza en los expertos toman la precaución de hacer consultas y valorar sus opiniones. También analiza cómo influyen las creencias anteriores, sobre todo las amenazas con carga política, en la percepción de riesgos.

Corwin (2016) plantea que los factores que controlan la percepción del riesgo son: (1) El *conocimiento* y la preparación para juzgar los peligros naturales y entender los razonamientos detrás de las decisiones oficiales. (2) La *confianza* en los científicos y los oficiales de emergencia como un facilitador de la comunicación y constituye la base para la aceptación y el rechazo de las evaluaciones de riesgo y las medidas de mitigación, respuesta y recuperación, en cuanto a que los fenómenos volcánicos implican una alta incertidumbre y, en general, existen un bajo conocimiento acerca de éstos, sin embargo, se debe tener en cuenta que una confianza excesiva también puede ser perjudicial al transferir su propia responsabilidad a los funcionarios de emergencia (Wachinger *et al.*, 2013 in Corwin, 2016). (3) Las *experiencias pasadas* influyen tanto en la confianza, como en el conocimiento de los peligros, sin embargo, la experiencia vivida con el tiempo va perdiendo su prominencia en modelar la percepción de riesgo y en motivar medidas de prevención, pero esta puede ser revivida con historias e imágenes (Wachinger *et al.*, 2013 in Corwin, 2016), por otro lado, los eventos volcánicos leves y efectivamente administrados pueden causar que las personas disminuyan sus medidas de preparación al sentirse más seguras (Johnston *et al.*, 1999 in Corwin, 2016). (4) La *autoeficacia* es la creencia del individuo en su propia capacidad de responder a eventos de manera efectiva y la *agencia personal* se refiere a la capacidad real de un individuo para actuar intencionalmente por su cuenta y protegerse (Bandura, 1997 in Corwin, 2016). Las actitudes fatalistas y no reconocer su agencia personal no motivan la adopción de medidas de prevención (Grothmann & Reusswig, 2006 in Corwin, 2016). (5) La variable demográfica social como el género, la edad, los ingresos y la educación con frecuencia demuestran que influyen en la percepción del riesgo, sin embargo, Haynes *et al.* (2007) no encuentra que exista una correlación entre el nivel de educación ni el género en la comprensión, por ejemplo, de los diferentes mapas. (6) La *pericia*, entiéndase a los profesionales de respuesta, influye en su percepción de riesgo a medida que su propia capacitación y experiencia profesional le empujan a ajustarse a las percepciones perpetuadas por su organización.

Calderón (2017) divide en ejes temáticos las diferentes aristas de la percepción de riesgo, incluyendo: la *caracterización* según la información sociocultural del individuo, la *cognición* según la información conocida y la ilusión de vulnerabilidad, el *afecto* según su apego al lugar donde vive y el *comportamiento* según sus conductas de autoprotección, prevención y acciones para disminuir el riesgo del individuo. Esto en base a que la comprensión de actitudes y creencias son necesariamente entendidas a través de una perceptiva psicológica al brindar respuestas para

involucrar mejor a la población a largo plazo al buscar campañas de comunicación dirigidas a obtener nuevos comportamientos en prevención de riesgos (Weiss *et al.*, 2011).

Finalmente, Andreastuti *et al.* (2017) señalan que las diferencias de perspectiva y comportamiento de las comunidades dan como resultado en respuestas diferentes ante las crisis, por lo tanto, la preparación comunitaria, tanto desde medidas tomadas por las agencias responsables como desde la auto gestión, funciona mejor cuando se considera la cultura local y las redes comunitarias, se identifican sus líderes y se les hace partícipe. La cultura local, el grado y el nivel de participación del gobierno, los roles de los líderes locales, la percepción local de los peligros y la intervención política son factores que influyen en la respuesta de una comunidad en el momento de la erupción.

En resumen, se tiene que la percepción de riesgo tiene una influencia en las medidas de protección de los individuos, y esto entre otros factores, a su vez, tiene influencia en el éxito de las medidas de preparación, respuesta y recuperación. Componentes específicos de esta percepción de riesgo como el conocimiento, la confianza, la pericia y la relevancia personal, tienen influencia en cómo son percibidos y usado los mapas de peligro. A su vez, en retroalimentación, los mapas también pueden influir en la percepción de riesgo tanto en las creencias personales del individuo, como un soporte ante la falta de conocimiento. es decir, las características visuales pueden llenar *vacíos* en el conocimiento de los usuarios permitiendo una mejor comprensión de los mapas y pueden proporcionar información esencial que puede quedar en la memoria a largo plazo.

2.5. Estudio de la Usabilidad

En la revisión bibliográfica del subcapítulo anterior se puede observar que entre los instrumentos más utilizados para la evaluación del uso de los mapas son los cuestionarios o encuestas (Petrovic & Masera, 2006; Schobesberger & Patterson, 2008; Haynes *et al.*, 2007; Savage *et al.*, 2014; Preppernau & Jenny, 2015; Thompson *et al.*, 2015), las entrevistas personales (Nave *et al.*, 2010; Severtson & Vatovec, 2012; Thompson *et al.*, 2015) y el uso de tecnología de seguimiento ocular (Wiebe *et al.*, 2005; Swienty *et al.*, 2008; Hegarty *et al.*, 2010). Además, de otro método menos ocupado para evaluar riesgos es a través de *focus group* (Joerin *et al.*, 2012).

En este subcapítulo se profundiza más acerca de la metodología recomendada por Duchowski (2017) denominada como *estudio de usabilidad incorporando tecnología de seguimiento ocular*,

la cual consiste en el análisis de mediciones subjetivas, como la medición de satisfacción (aprendizaje, utilidad, control, eficiencia, afección) mediante la escala *Likert*, y mediciones objetivas, como la medición de rendimiento (eficiencia y efectividad), de procesos cognitivos (número de fijaciones, duración de fijaciones, etc.) y atención visual, evaluadas a través del rechazo o aceptación de una hipótesis nula utilizando pruebas estadísticas y la interpretación de acuerdo con lo que se conoce acerca de la relación entre los movimientos oculares y la atención visual.

2.5.1. Diseño Experimental

El experimento es un caso particular de estudio donde, en general, se eliminan todas las posibles causas de variación en el efecto que se mide, excepto de la influencia que se está investigando. Este filtro es una consideración clave para los diseños experimentales, por ello existen algunas especificaciones que deben definirse para lograr el mejor acercamiento a esta consideración: (1) definir la hipótesis nula o alterativa con su consecuente justificación para cualquier suposición. (2) Realizar el diseño experimental definiendo estrictamente, primero, las variables dependientes e independientes, y luego especificar los diversos enfoques del diseño. (3) Definir el número de participantes, teniendo en consideración si maximizar la cantidad para mejorar la validez estadística o reducirla para la trazabilidad del estudio; además de agregar su descripción demográfica como rangos de edad, distribución de género, etc. (4) Describir los aparatos utilizado, en este caso las especificaciones del aparato de seguimiento ocular, como su mecanismo, precisión, tasa de muestreo o rango de operación, y cualquier otro artefacto auxiliar como, por ejemplo, uso de mentonera. (5) Describir detalladamente los procedimientos, desde la calibración hasta el final del experimento. (6) Describir las tareas que los participantes van a realizar en el experimento, definir, además, si serán procesamientos *top-down* o *bottom-up*.

Sobre esta línea, la primera consideración es la formulación de una pregunta de investigación y su consecuente hipótesis, de este modo, los lineamientos del diseño experimental siguen un patrón el cual conduce a aceptar o rechazar la hipótesis preliminar. En este caso, se formula una hipótesis nula (H_0) que predice que no existe una diferencia significativa entre los resultados medidos entre dos o más conjuntos de datos obtenidos en diferentes condiciones, rechazar esta hipótesis tiene como consecuencia el soporte de la hipótesis alternativa (H_1) la cual predice que sí existe una diferencia significativa.

El tratamiento intencionado de las diferentes condiciones se conoce como *variable independiente*, un experimento busca que todas las demás variables que pueden afectar a los conjuntos de datos se mantengan constantes. Lo que es medido, y de lo cual se espera obtener resultados, se conoce como *variable dependiente*. Para los experimentos de seguimiento ocular las variables independientes pueden ser una interfaz gráfica o un grupo humano con características definidas, etc. a quienes se les asigna tareas definidas de las cuales se pueden medir las variables dependientes como, por ejemplo, el tiempo de reacción, las tasas de error, número de fijaciones, duración de las fijaciones, etc.

Los diferentes enfoques de los diseños experimentales son: (1) distinguir entre experimento y estudio observacional, esto depende de si se puede o no manipular la variable independiente. (2) Definir si se realizará en un *laboratorio* o en *terreno*, el primero permite un mayor control sobre las condiciones experimentales, sin embargo, algunos cuestionan la posibilidad de generalizar los resultados sobre entornos naturales, por lo tanto, los experimentos en laboratorio sufren una reducción de validez ecológica, pero adquieren una mayor validez interna. (3) Definir si es un estudio idiográfico o nomotético, el primero se refiere al estudio que busca la caracterización global de un individuo y el segundo al estudio de una característica que se generaliza sobre una población. (4) Definir si es de caso particular o una muestra de población, el primero involucra la selección de un único tipo de individuo o a un grupo de personas con las mismas características, por ejemplo, un grupo de expertos de una disciplina; el segundo se realiza con un grupo de personas aleatoria con la intención de generalizar los resultados a una población más amplia o global. (5) Definir si el método será inter sujeto o entre sujeto, el primero consiste que las diferentes variantes de la variable independiente son testeadas en todos los sujetos, en cambio, el segundo, consiste que a diferentes grupos de sujetos se le aplican las diferentes variantes de la variable independiente; uno de los problemas principales del método inter sujeto es que los resultados del análisis pueden sufrir sesgo por fatiga o aprendizaje, en cambio el método entre sujeto debe tenerse cuidado de evitar la homogeneidad accidental de los diferentes grupos.

Finalmente, respecto a la elección de tareas, la cual influye directamente sobre los resultados de los movimientos oculares, algunas recomendaciones son: (1) las instrucciones mostradas a los participantes deben ser coherentes y de fácil comprensión. (2) Se debe detallar los tipos de estímulo presentado a los participantes como los entornos del diseño, los elementos que ahí se incluyen (si son estáticos o dinámicos), etc. (3) Considerar alguna técnica de análisis de tareas como: la

descomposición de tareas en subtareas, su clasificación taxonómica del conocimiento de las tareas, la elaboración de listado de acciones realizadas y herramientas utilizadas. (4) Se recomienda que la duración de las tareas debe ser corta (segundos a minutos), incluso, si una tarea es larga es recomendable subdividirla en subtareas para facilitar la gestión y el análisis de los datos. (5) Se debe calibrar participante por participante al inicio del experimento.

2.5.2. Análisis de los Datos de Seguimiento Ocular

2.5.2.1. Clasificación de los Datos

Los datos de seguimiento ocular complementan el conjunto de métricas de los estudios de usabilidad, comunes en la investigación de factores humanos. Las métricas subjetivas se evalúan a través de medidas de *satisfacción* mediante preguntas asociadas al *aprendizaje* (puedo aprender todas las características de este sistema), *utilidad* (las instrucciones del sistema son útiles), *control* (sé que hacer a continuación con este sistema), *eficiencia* (si el sistema se detiene, no es fácil volver a lo que estaba haciendo) y *afección* (recomendaría este sistema a un amigo). Las preguntas pueden ser formuladas y cuantificadas en una escala tipo *Likert*, por ejemplo, del uno al cinco, sin embargo, siguen siendo consideradas una perceptiva cualitativa. Por otro lado, las métricas objetivas se evalúan a través de medidas de *rendimiento*, como eficiencia (tiempo para completar una tarea) y eficacia (número de errores cometidos); y a través de las mediciones de *procesos*. los cuales las más básicas son fijación, duración de la fijación, tasa de fijaciones (global), promedio de duración de fijaciones, número de fijaciones global, secuencia de fijaciones, % promedio de tiempo por área de interés, número de fijaciones por área de interés y duración promedio por área de interés (Jacob & Karn, 2003 in Duchowski, 2017). También se puede obtener resultados de procesos a través de mapas gaussianos de atención visual.

2.5.2.2. Registro de los Datos de Seguimiento Ocular

El objetivo de la medición y análisis del movimiento ocular es comprender el comportamiento de la atención visual de los participantes, por tanto, el uso de las mediciones de procesos son posibles de obtener de la señal del movimiento del ojo en términos de sus movimientos oculares destacados, es decir, sacadas y fijaciones. Típicamente, esto consiste en ubicar regiones donde el promedio de

La señal cambia abruptamente de posición, lo que indica el final de una fijación y el inicio de una sacada. Luego asume una característica estacionaria que indica el comienzo de una nueva fijación (Fig. 2.11). Una fijación es determinada por un umbral de tiempo predeterminado.

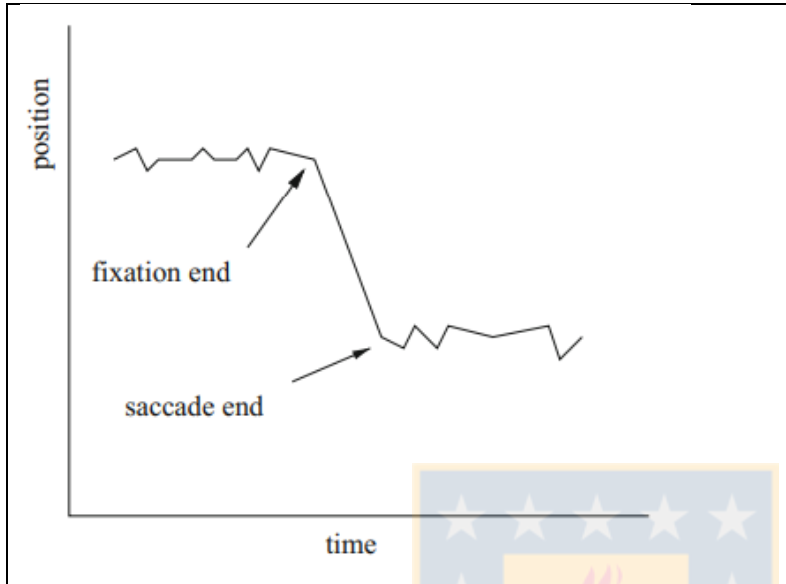


Figura 2.11: Gráfica de posición contra el tiempo de las señales del movimiento ocular. Las sacadas pueden considerarse entre límites de señal promedio en el tiempo. Obtenido de Duchowski (2017).

Los posibles ruidos en la señal son determinados por la inestabilidad inherente del ojo y los parpadeos, por otro lado, la precisión generalmente se degrada en las regiones periféricas extremas. Por lo tanto, además de eliminar los datos de parpadeo, se recomienda ignorar las señales fuera del rango operativo efectivo.

De este modo, Voßkübler *et al.* (2008) diseñan el programa OGAMA 5.0.1, el cual detecta cada fijación buscando una secuencia de mediciones desde un punto de observación que permanecen relativamente constantes dentro de una región circular alrededor del promedio de la fijación en curso, cuyo radio del círculo es una distancia máxima que puede ser especificada por el usuario. También, para adaptarse a los ruidos, si un punto de mirada se excede del umbral del radio, se incluye en la fijación si posteriormente vuelve al umbral del radio en un umbral de tiempo determinado. Por otro lado, el programa elimina los datos de los parpadeos y omite los datos que se encuentran fuera de la pantalla. Por lo tanto, lo que se registra, finalmente, es una base de datos en bruto que incluye el diámetro X e Y de la pupila, posición X e Y de la mirada, y el tiempo de duración. Posteriormente, el programa puede calcular los parámetros de mirada tales como: número de fijaciones, el promedio de la duración de las fijaciones, la razón entre las fijaciones y sacadas, distancia entre una fijación y su fijación posterior, velocidad entre una fijación y su fijación

posterior, etc. También es posible calcular la similitud en patrones de recorrido entre cada participante en el experimento.

Además, se pueden calcular mapas de atención que representan la magnitud del tamaño de un estímulo, usando *Kernel gaussiano*, el cual consiste en una distribución isotrópica de la desviación estándar (s), considerando un promedio cero de la posición de la mirada (x, y) de un número ajustable de participantes, del cual también se puede ajustar el grado de suavizado de la distribución de la fijación. La fórmula es:

$$f(x, y) = \frac{e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}}{2\pi\sigma^2} \quad x, y \in [-s, s]$$

La desviación estándar interna (σ) se configura a un quinto del valor de la desviación estándar. Cada valor de fijación se pondera por un factor dado por la duración de la fijación y , finalmente, normalizado según el promedio de la matriz de posiciones de las fijaciones.

2.5.2.3. Interpretación de los Datos

Para la interpretación de los datos, Duchowski (2017) recomienda la utilización del análisis de varianza para determinar si la manipulación de las variables independientes tiene un efecto estadísticamente significativo sobre las variables dependientes. El tipo de prueba estadística realizada para probar la hipótesis depende del tipo de los datos recopilados y del número de muestras o grupos medidos. En este caso los datos de movimiento ocular se consideran paramétricos, es decir, se pueden representar en una escala de intervalo uniforme y de relación a un cero absoluto. Por lo tanto, es posible aplicar las pruebas estadísticas *T-test* para un par de muestras y el análisis de varianza (ANOVA) para datos multivariados. El primero consistió en informar si dos conjuntos de números se superponen en un sentido estadístico, basándose en que los datos se ajustan a una distribución normal, entonces, evalúa que tanto se superponen ambas distribuciones. El segundo también se basa en la distribución normal, pero añade una función de los grados de libertad df entre e intragrupo, que informa si existe una distancia significativa entre las superposiciones de los promedios dando como resultados un estadístico F y un nivel de significancia entre los promedios s . Se recomienda que, luego de comprobar que hay significancia

estadística con ANOVA, se use *T-test* por cada par de combinaciones de datos, o *Kruskal-Wallis* por parejas si no se puede suponer que los datos están distribuidos normalmente.

Algunos trabajos dan directrices de cómo interpretar cualitativamente las mediciones. Wiebe *et al.* (2005) indican que las mayores distancias promedio entre fijaciones son indicadores de una mejor habilidad exploratoria de los mapas, por tanto, es una típica señal mostrada por los expertos. Además, la duración de fijación promedio y el número de fijaciones en una región son indicadores de la relevancia de lo que se muestra, pero a la vez de la complejidad percibida de la información (Carpenter & Just, 1978 *in* Wiebe *et al.*, 2005).

Por otro lado, Swienty *et al.* (2008) consideran que para interpretar los parámetros de movimiento ocular como, por ejemplo, el número de fijaciones, repetición de fijaciones y duración de fijaciones sobre el enfoque de orientación de la atención, las siguientes pautas son considerables: (1) Cuanto menor son los valores de los parámetros, más eficiente es la metodología del diseño, y (2) cuánto más grandes sean los valores de los parámetros de escaneo visual, más difícil es la tarea.

Hegarty *et al.* (2010) calculan tanto la proporción de tiempo de fijación de la mirada entre las áreas relevantes y el total, e irrelevantes y el total, así como el tiempo pasado antes que la primera fijación estuviese sobre el área relevante, esto para determinar cómo influye la saliencia visual en el uso de los mapas.

Finalmente, Duchowski (2017) explica que las variables dependientes deben estar asociada a una descripción cualitativa de calidad atencional, por ejemplo, la atención visual cuantificada según el número de fijaciones en un área determinada. Esta definición de las variables, y como se relacionan con las tareas definidas, es fundamental al momento de interpretar, finalmente, los datos obtenidos.

3. MARCO GEOLÓGICO Y VOLCANOLÓGICO

La geología del volcán Villarrica ha sido recopilada por Moreno & Clavero (2006) en el mapa cartográfico de la Geología del Volcán Villarrica del SERNAGEOMIN (Fig. 3.1; Tabla 3.1) del cual se basa, en general, las clasificaciones y descripciones de este capítulo.

Detalles acerca de la historia eruptiva del volcán Villarrica se presentan en el subcapítulo 4.2. Son considerados para esta Memoria de título como erupciones históricas desde 1558 hasta el presente.

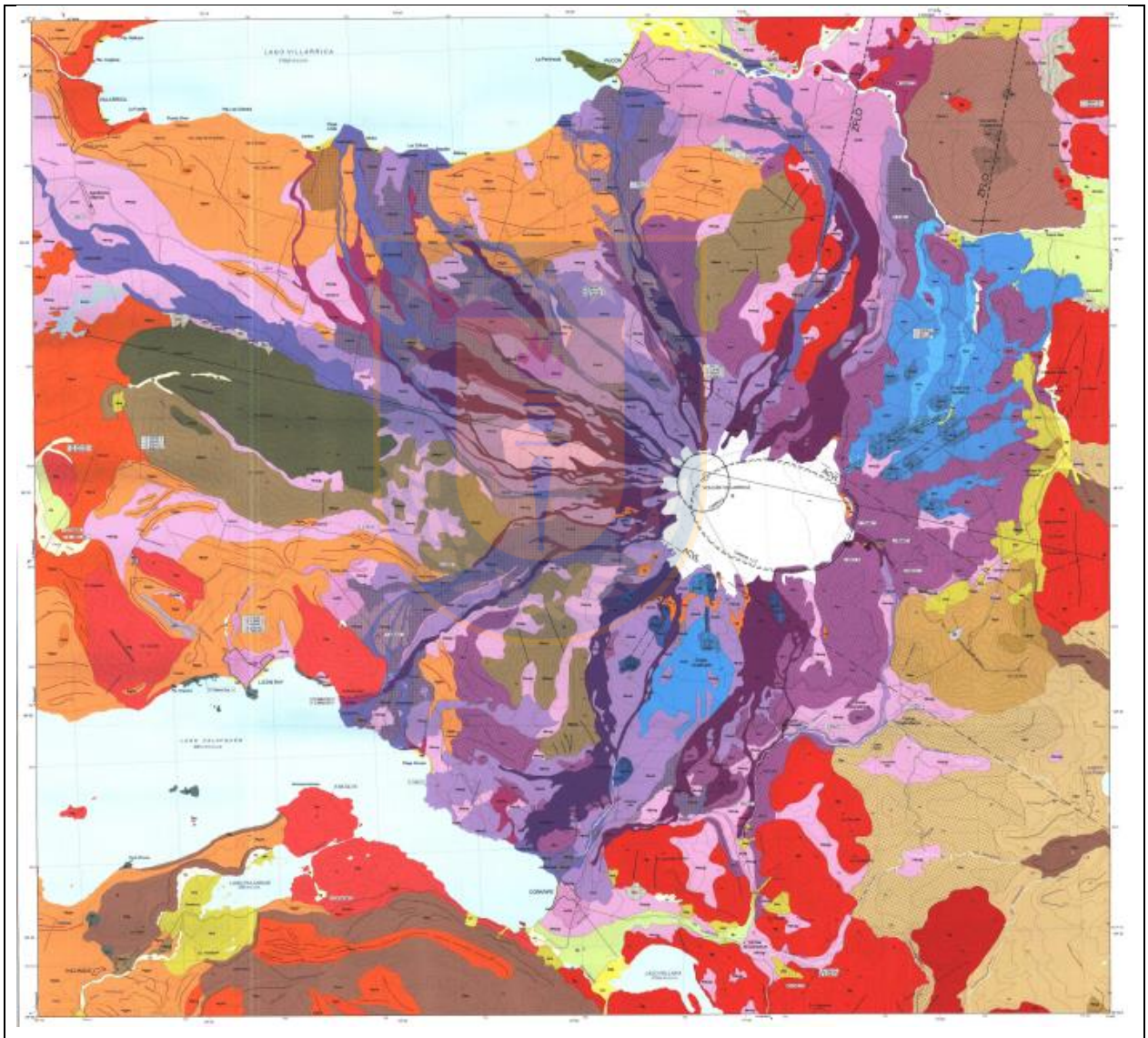


Figura 3.1: Mapa geológico del volcán Villarrica. Polígonos verde, café claro, azul y violeta grisáceo: rocas estratificadas. Rojo: rocas intrusivas. Violeta y morado: rocas y depósitos volcánicos del Villarrica. Azul: centros volcánicos adventicios. Amarillo y naranja: depósitos volcano-sedimentarios. Café oscuro: depósitos de otros volcanes (Tabla 3.1). Obtenido de Moreno & Clavero (2006).

Tabla 3.1: Leyenda del mapa geológico del volcán Villarrica. Modificado de Moreno & Clavero (2006).

Depósitos Sedimentarios y Volcanoclásticos		Plq1	Unidad Quetrupillán 1
Hf	Depósitos fluviales	Plem	Volcán Cordillera El Mocho
Hal	Depósitos aluviales	Plsq	Volcán Sierra de Quinchilca
Hdel	Depósitos deltaicos	Rocas Plutónicas	
Hpl	Depósitos de litoral costero	Mg	Intrusivos del Mioceno
Hg	Depósitos glaciales recientes	Kg	Intrusivos del Cretácico
Hrm	Depósitos de remoción en masa	Pzg	Intrusivos del Paleozoico
Hp	Depósitos poligénicos	Volcan Villarrica	
Hc	Depósitos coluviales	<i>Unidad Villarrica 3</i>	
Plg2l	Glaciación Llanquihue glaciolacustres	Hv3	Subunidad Histórica lava (año)
Plg2m	Glaciación Llanquihue morrénicos	Hv3lh	Subunidad Histórica lahar (año)
Plg1l	Glaciación Santa María glaciolacustres	Hv3lh	Subunidad Histórica lahar ind.
Plg1m	Glaciación Santa María morrénicos	Hv3	Subunidad Pre-Histórica lava
Rocas Estratificadas y Metamórficas		Hv3lha	Subunidad Pre-Histórica lahar
PPléh	Estratos de Huincacara	<i>Unidad Villarrica 2 y 1</i>	
Mepp	Estratos de Península Pucón	PIHv2p	Unidad Villarrica 2 d. piroclásticos
OMeph	Estratos de Pino Huacho	PIHv2l	Unidad Villarrica 2 lavas
Trp	Formación Panguipulli	Plv1	Unidad Villarrica 1
DCt	Complejo Metamórfico Trafún	<i>Centros Volcánicos Adventicios</i>	
Otros volcanes del área		Hln2	Subgrupo Los Nevados 2
Hl1	Volcanes Huelemolle	Hln1	Subgrupo Los Nevados 1
PIHq3	Unidad Quetrupillán 3	Hch2	Subgrupo Chaillupén 2
Plq2	Unidad Quetrupillán 2	Hch1	Subgrupo Chaillupén 1

3.1. Rocas del Basamento

3.1.1. Rocas Estratificadas

3.1.1.1. Complejo Metamórfico Trafún

El Complejo Metamórfico Trafún es una unidad metamórfica definida por Campos *et al.* (1998, *in* Moreno & Clavero, 2006), el cual se distribuye en el sector SW del volcán Villarrica, unos 7 km al NE de Licán Ray. Están cubiertos parcialmente por depósitos glaciares o piroclásticos provenientes del volcán Villarrica. Corresponde a una unidad metamórfica de metapelitas de bajo a mediano grado metamórfico, localmente presenta gneises con porfiroblastos de quistolita o cordierita y gradan transicionalmente a filitas y cuarcitas. Está localmente afectado por fuerte deformación y se piensa que los porfiroblastos mencionados anteriormente son generados por intrusivos del Carbonífero al Pérmico (Munizaga *et al.*, 1988). La definición y edad de estas rocas ha sido discutida en diversos trabajos (Aguirre & Levi, 1964 *in* Moreno & Clavero, 2006; Franzese, 1995 *in* Moreno & Clavero, 2006; Illies, 1970 *in* Moreno & Clavero, 2006), sin embargo, finalmente, ha sido asignada a la parte oriental del Complejo Metamórfico Trafún con edad del Devónico al Carbonífero.

3.1.1.2. Formación Panguipulli

La Formación Panguipulli es una unidad estratigráfica definida por Aguirre & Levi (1964, *in* Moreno & Clavero, 2006), la cual se distribuye en el sector SW del volcán Villarrica, desde la localidad de Licán Ray hasta unos 2 km al W de ésta. Corresponde a una secuencia sedimentaria plegada formada por la alternancia entre lutitas de 5 a 30 cm de espesor con areniscas cuarcíferas finas a gruesas de 7 a 40 cm de espesor y, localmente, alternadas con ortoconglomerados cuarcíferos de hasta 110 cm de espesor. También posee localmente un abundante contenido fosilífero. Estas rocas están afectadas por metamorfismo de contacto generado por intrusivos del Jurásico, Cretácico y del Mioceno (Munizaga *et al.*, 1988). La secuencia tiene una disposición espacial homoclinal con rumbo 5-20°W y manteo de 50°E. La última edad asignada a esta formación fue realizada por Herbst *et al.* (2005 *in* Moreno & Clavero, 2006) y confirmada por Zavattieri *et al.* (2003 *in* Moreno & Clavero, 2006) a partir del estudio de taofloras en sedimentos

lacustres, asignándoles una edad del Triásico Superior, específicamente del Cárnico Superior al Nórico.

3.1.1.3. Estratos de Pino Huacho

Los estratos Pino Huacho es una unidad estratigráfica informal definida por Moreno & Clavero (2006), la cual se distribuye en el sector W, entre las localidades de Licán Ray y Villarrica, así como en los flancos N y S del volcán Villarrica. Corresponde a una secuencia plegada de lavas, tobas brechosas y de lapilli de composición andesítica de 3 a 5 m de espesor, con intercalaciones de rocas sedimentarias epiclásticas, localmente con presencia de rocas córneas y cuerpos subvolcánicos de la misma composición, como diques y filones. Éstas están afectadas localmente por metamorfismo de contacto y presentan alteración a clorita y epidota, piritización y silificación. El metamorfismo es producto de intrusivos del Mioceno Superior (Munizaga *et al.*, 1988). La edad es asignada debido a su correlación estratigráfica con los Estratos del Lago Ranco (Campos *et al.*, 1998 *in* Moreno & Clavero, 2006) que afloran hacia el S del área, por lo tanto, la edad es del Oligoceno al Mioceno.

3.1.1.4. Estratos de Península Pucón

Los estratos de Península Pucón es una secuencia informal de rocas efusivas y volcanoclásticas definida por Moreno & Clavero (2006), la cual aflora en el sector de la Península, al W de la ciudad de Pucón. Estas rocas están cubiertas por depósitos piroclásticos y laháricos del volcán Villarrica. Corresponde a una secuencia subhorizontal a débilmente plegada de lavas andesíticas amigdaloidales con estructuras primarias bien conservadas, conglomerados y brechas piroclásticas, y tobas líticas de lapilli; todas éstas de composición andesítica, en capas de 5 a 8 m de espesor. La secuencia es cortada por numerosos diques y filones manto de composición andesítica y, por lo general, textura afanítica. Los estratos presentan un rumbo generalizado NNE y manteos de 5 a 30°W. La edad es asignada debido a la ausencia de metamorfismo de contacto asociado a los intrusivos del Mioceno Superior (los cuales se encuentran en zonas cercanas a estas rocas), por lo tanto, la edad es del Mioceno Medio al Superior.

3.1.1.5. Estratos de Huincacara

Los estratos de Huincacara es una secuencia epiclástica informal definida por Moreno & Clavero (2006), la cual aflora formando cordones montañosos en el sector W del volcán Villarrica, entre las localidades de Villarrica y Licán Ray. Corresponde a una secuencia subhorizontal de conglomerados, areniscas y brechas epiclásticas, principalmente con fragmentos volcánicos andesíticos. Se dispone en discordancia angular por sobre los Estratos de Pino Huacho. La edad es asignada debido a su similitud petrográfica con la Formación Malleco, del Plioceno Superior al Pleistoceno.

3.1.2. Rocas Intrusivas

3.1.2.1. Intrusivos del Paleozoico

Los intrusivos del Paleozoico afloran en el sector SW del volcán Villarrica, cerca de la localidad de Licán Ray. Corresponden a granitos, granodioritas y tonalitas de grano grueso. Algunos de estos cuerpos intrusivos generarían un ligero metamorfismo de contacto con las rocas de la Formación Panguipulli. La edad se asigna según datos geocronológicos de rocas de petrografía similar ubicadas al sur entre los lagos Riñihue y Panguipulli (Munizaga *et al.*, 1988) y, posteriormente, de dataciones de la misma roca (Campos *et al.*, 1998 *in* Moreno & Clavero, 2006), por lo tanto, corresponde a rocas de edad Carbonífero Superior al Pérmico.

3.1.2.2. Intrusivos del Cretácico

Los intrusivos del Cretácico afloran en el sector SE del volcán Villarrica, entre el río Quilalelfu y el Reyehueico. Corresponden a tonalitas, dioritas cuarcíferas y granodioritas. Localmente presentan foliación magmática débil y una gran cantidad de enclaves máficos. La edad es determinada por datos geocronológicos de Lara & Moreno (2004, *in* Moreno & Clavero, 2006) y de resquicios al E del lago Villarrica (Munizaga *et al.*, 1988), se asocia al miembro más occidental de la franja de granitoides cretácico al E del volcán Villarrica, por lo tanto, corresponde a rocas del Cretácico.

3.1.2.3. Intrusivos del Mioceno

Los intrusivos del Mioceno afloran en el sector E, tanto al S, como al N del volcán Villarrica, forman parte de su basamento oriental. Corresponden a dioritas, tonalitas y granodioritas que poseen, localmente, estructuras de *roof pedants* de rocas cenozoicas y con texturas migmatíticas. La edad es determinada por datos geocronológicos de Munizaga *et al.* (1988) en rocas de esta unidad encontradas en las localidades de Quelhue, Caburgua y Los Añiques, y por datos de Lara & Moreno (2004 *in* Moreno & Clavero, 2006), finalmente, son asociadas a la extensión septentrional de la franja de granitoides miocenos denominada Granitoides Pellaifa-Neltulme (Lara & Moreno, 2004 *in* Moreno & Clavero, 2006), por lo tanto, corresponde a rocas del Mioceno.

3.2. Rocas y Depósitos Volcánicos

El volcán Villarrica corresponde a un estratovolcán compuesto, que tiene una altura de 2.847 m s.n.m. y cubre un área de 700 km² con un volumen de depósitos sobre los 250 km³ (Moreno, 2000). En el contexto de la edificación de su cono principal, los productos han sido agrupados en tres fases de evolución según criterios estratigráficos, geomorfológicos, estructurales y geocronológicos, éstos son las unidades Villarrica 1, 2, y 3. Las unidades son secuencias de rocas efusivas y volcanoclásticas definidas por Moreno (1993 *in* Moreno & Clavero, 2006) y modificada por Clavero & Moreno, 2004.

3.2.1. Unidad Villarrica 1

La Unidad Villarrica 1 es separada en dos etapas, delimitadas por un evento eruptivo mayor que provocó el colapso parcial del edificio generado durante la primera etapa. La edad de toda la unidad es del Pleistoceno Medio al Superior.

La primera etapa son rocas que afloran en las partes bajas de los flancos del volcán, aunque presenta mayor extensión en el flanco E donde llegan, localmente, hasta el sector de Palguín. Están cubiertas por las unidades Villarrica 2 y 3. Corresponden a una secuencia de: (1) lavas de tipo *aa* y *pahoehoe* de composición basáltica a andesítica basáltica con espesores entre 1 y 15 m (localmente hasta 100 m en el flanco sur). (2) Brechas piroclásticas de caída y de flujo con diferentes grados de soldamiento y consolidación, de composición basáltica a andesítica basáltica. (3) Abundantes

depósitos de lahares de espesores entre 2 a 5 m. La edad fue determinada por métodos radiométricos en lavas en la parte basal de los flancos E y S del volcán y en el borde de la caldera, dando como resultado entre los 600 y 500 ka antes del presente (AP), y entre los 200 y 170 ka AP.

El primer colapso del edificio volcánico es evidenciado por el borde caldérico afectado por fracturas anulares, llamado Caldera 1, el cual tiene un tamaño de 6,5 por 4,2 km de diámetro. La edad es determinada, tanto por métodos radiométricos, como por relaciones estratigráficas, teniendo una edad entre los 170 ka y 95 ka AP.

La segunda etapa son rocas que afloran en el flanco E, emplazados en las cercanías de las fracturas anulares de Caldera 1, las cuales se intruyen o disponen sobre la primera etapa de la misma unidad; y en el flanco W bajo las cuales están por debajo, principalmente, de la Ignimbrita Licán de la Unidad Villarrica 2 y por sobre depósitos de morrena de la Glaciación Santa María (Porter, 1981 *in* Clavero & Moreno, 2006; Clayton *et al.*, 1997 *in* Clavero & Moreno, 2006). El primer afloramiento corresponde a domos de pequeño tamaño con alturas que no superan los 80 m y diámetros de 200 m, y a filones y diques que no superan los 3 m de espesor; ambos de composición dacítica. El segundo afloramiento corresponde a una secuencia de depósitos piroclásticos de flujo entre 30 cm a 2 m y de caída de hasta 30 cm, muy alterados, las cuales se relacionan a erupciones subplinianas (Gaytán *et al.*, 2006 *in* Moreno & Clavero, 2006). Clavero & Moreno (2004), por su parte, presentan una datación de uno de los domos y Gaytán *et al.* (2005 *in* Clavero & Moreno, 2006), por la otra, presentan una datación de la parte superior de uno de los depósitos piroclásticos, de lo cual, en su conjunto, la edad de la segunda etapa es determinada previa y durante la Glaciación Llanquihue, entre los 95 ka y los 13,9 ka AP.

3.2.2. Unidad Villarrica 2

La Unidad Villarrica 2 es la etapa más explosiva del volcán Villarrica cuya base y techo de esta unidad se encuentran formados por depósitos de dos eventos eruptivos mayores: Ignimbrita Licán e Ignimbrita Pucón respectivamente. La edad de toda la unidad es del Pleistoceno Superior al Holoceno.

La base es denominado Ignimbrita Licán, la cual corresponde a extensos depósitos de piroclásticos de caída, flujo y de oleada que cubren un área sobre los 1.000 km² con un volumen estimado de 10 km³. Éstos se originaron por una gran erupción que habría tenido interacción con agua (Lohmar *et*

al., 2007) y generado un colapso de la antigua Caldera 1, formando la Caldera 2 (del mismo tamaño). La edad de la base es determinada por dataciones radiométricas en madera carbonizada contenida en diferentes niveles del depósito (Moreno *et al.*, 1994 *in* Clavero & Moreno, 2006; Clavero, 1996 *in* Clavero & Moreno, 2006; Denton, 1998 *in* Clavero & Moreno, 2006; Robin, 2004 *in* Clavero & Moreno, 2006), dando como resultado estimado de 13,9 ka AP.

El edificio de esta unidad se distribuye hacia todos los flancos del volcán, formando un estratocono edificado desde el borde NW de Caldera 1, hasta su parte más alta, la cual está parcialmente truncada por un colapso eruptivo. Esta unidad se dispone normalmente en discordancia de erosión (por acción glacial) sobre la Unidad Villarrica 1 y sobre depósitos de la Glaciación Llanquihue, o en discordancia de erosión y angular con rocas del basamento. Corresponde a una secuencia de: (1) lavas *pahoehoe* y *aa* de composición andesítica basáltica de entre 1 a 10 m de espesor y con extensiones hasta los 18 km de la fuente. (2) Depósitos piroclásticos de flujo, oleada y de caída de composición andesítica basáltica con espesor de 25 m y con extensiones hasta los 25 km de la fuente. (3) Intercalaciones de depósitos laháricos. La edad de la unidad es determinada por dataciones radiométricas en material vegetal carbonizada en distintos niveles de la secuencia (Moreno *et al.*, 1994 *in* Clavero & Moreno, 2006; Clavero & Moreno, 2004), dando un rango de edad entre los 13,9 ka y 3,7 ka AP.

Finalmente, el techo es denominado como Ignimbrita Pucón, la cual es una serie de depósitos piroclásticos de flujo, de oleada, y en menor medida de caída, que alcanzan un máximo de 100 m de espesor en las paleoquebradas y cubren un área aproximada de 500 km² con un volumen estimado en 5 km³. Estos depósitos se originaron en una gran erupción que generó un colapso de la parte alta del edificio formando la Caldera 3 con 2 km² de diámetro. La edad de la base es determinada por dataciones radiométricas en madera carbonizada contenida en diferentes niveles del depósito (Moreno *et al.*, 1994 *in* Clavero & Moreno, 2006; Clavero, 1996 *in* Clavero & Moreno, 2006), dando como resultado estimado una edad de 3,7 ka AP.

3.2.3. Unidad Villarrica 3

La Unidad Villarrica 3 se edifica en la actual etapa evolutiva del volcán Villarrica, se divide en la subunidad Pre-Histórica y la subunidad Histórica, las cuales se distribuyen hacia todos los flancos del volcán. Conforman unos 450 m de altura de cono que se construye sobre la depresión (Caldera

3) generada por el colapso ocurrido durante la erupción de la Ignimbrita Pucón, y cuyos productos se distribuyen flancos abajo del volcán cubriendo las unidades Villarrica 1 y 2, y el basamento. Corresponde a una secuencia de lavas, depósitos de piroclásticos de caída, flujo y oleada, todas de composición basáltica a andesítico basálticas, y depósitos laháricos. Los depósitos piroclásticos de caída se distribuyen principalmente hacia el flanco oriental del volcán y están constituidos por fragmentos de escorias tamaño ceniza a lapilli grueso. En cambio, los depósitos laháricos se distribuyen en todos los flancos del volcán con extensiones variables que incluso llegan a los lagos Villarrica y Calafquén, y están constituidos de brechas monomícticas a polimícticas, algunos de estos lahares son macizos y no tienen estructuras, con bloques de hasta 8 m de diámetro inmersos en una matriz arenosa, y otros lahares son formados por arena fina a media con abundantes estructuras como laminación cruzada y paralela, con gradación inversa o normal (Castruccio, 2005 *in* Moreno & Clavero, 2006; Castruccio & Clavero, 2006 *in* Moreno & Clavero, 2006).

La subunidad Pre-Histórica, la más antigua, incluye los productos generados desde 3,7 ka AP hasta las erupciones históricas anteriores al 1787 y la subunidad Histórica incluye los productos desde las erupciones posteriores a 1787 hasta la última erupción ocurrida el 03 de marzo de 2015.

3.2.4. Centros Volcánicos Adventicios

3.2.4.1. Grupo Los Nevados

El Grupo Los Nevados es un conjunto de conos de piroclastos y lavas asociadas, ubicados al NE al borde de la Caldera 1, los cuales se han dividido en el Subgrupo Los Nevados 1 y Subgrupo Los Nevados 2. Los primeros fueron generados y controlados a partir de cuatro fisuras, tienen bases subcirculares de hasta 800 m de diámetro, alturas menores a 80 m y cráteres abiertos hasta 350 m de diámetro. Las lavas son de composición andesítico basáltico y presentan superficies rugosas tipo *aa* con extensiones hasta 9 km. Los segundos fueron generados y controlados por dos de las cuatro fisuras, las del extremo E y W, tienen bases subcirculares a elípticas de hasta 600 m de diámetro, alturas inferiores a 60 m y cráteres abiertos de hasta 200 m de diámetro. Las lavas son de composición andesítico basáltico y presentan también morfologías primarias tipo *aa* bien conservadas con extensiones de hasta 8,5 km. La diferencia entre el primer y segundo subgrupo es que el primero está cubierta con depósitos piroclásticos de la Unidad Villarrica 3 de hasta 2.600

años AP, por lo que estima como edad del primero como anterior a ese año y, el segundo, como posterior.

3.2.4.2. Grupo Chaillupén

El Grupo Chaillupén es un conjunto de conos piroclásticos y lavas asociadas, ubicados en el flanco S-SW del volcán, los cuales son encontrados alineados en dirección NS y N35°E, por lo que son asociados a fisuras radiales alrededor del estratovolcán Villarrica. Se subdivide en el Subgrupo Chaillupén 1 y Subgrupo Chaillupén 2. El primero está generado a partir de tres fisuras, tienen bases subcirculares de hasta 600 m de diámetro, alturas inferiores a 80 m y cráteres abiertos de hasta 300 m de diámetro. Las lavas son de composición andesítico basáltico con morfologías primarias tipo *aa*, ligeramente erosionadas y con extensiones de hasta 3 km (aunque podrían tener una extensión mayor). Los segundos está generado a partir de una fisura central de orientación NS, tienen bases circulares a subcirculares de hasta 750 m, alturas inferiores a 100 m y cráteres, uno abierto, de hasta 250 m de diámetro. Las lavas son de composición andesítico basáltico con morfologías tipo *aa* bien preservadas y con extensiones de hasta 4,5 km. La diferencia entre el primer y segundo subgrupo es que el primero está cubierto con depósitos piroclásticos de la Unidad Villarrica de hasta 3.700 años AP, por lo que estima como edad del primero como anterior a ese año y, el segundo, como posterior.

3.3. Marco Tectónico

El volcán Villarrica es ubicado en la Zona Volcánica Sur (ZVS) del arco andino. Lara (2004) resume la configuración tectónica de la zona y contextualiza el volcanismo en las regiones relacionadas con el volcán Villarrica.

A escala continental, los volcanes Villarrica, Quetrupillán y Lanín forman una cadena volcánica orientada en dirección N50°W, oblicua al arco volcánico, alineadas como consecuencia de una estructura cortical preandina, la cual forma parte del trazo principal de la estructura denominada como Falla Gastre (Coira, 1975 *in* Lara, 2004; Spalletti & Dalla-Salda, 1996 *in* Lara, 2004) siendo interpretada como el margen paleogeográfico de Gondwana (Dalla-Salda *et al.*, 1991 *in* Lara, 2004; Franzese, 1995 *in* Lara, 2004) donde es posible observar la acumulación de un prisma acrecionario

del Paleozoico y su subsecuente metamorfismo regional Paleozoico a Triásico. Tal estructura facilitaría el ascenso directo de magma que alimentaría el volcanismo del sector (Cembrano & Lara, 2009 *in* Vera, 2018).

A escala regional, la estructura está situada más al N del borde geológico de un bloque tectónico mayor (Chotin, 1975 *in* Lara, 2004) formado por la yuxtaposición de rocas metasedimentarias y volcánicas (Paleozoico superior al Triásico) con el Batolito Norpatagónico (Mesozoico al Cenozoico).

A escala local, un sistema estructural principal forma un conjunto de alineamientos superficiales, enfatizados por la erosión glacial del Pleistoceno. A pesar de que existen tan solo unas pocas fallas mesoscópicas que son observables, un análisis microtectónico sobre dicho sistema de fallas revela un estrés tensional compatible con la transpresión dextral durante el Cuaternario.

Moreno *et al.* (1994) *in* Lara (2004) sugieren que la cadena montañosa Villarrica-Lanín produce un desplazamiento en el sentido lateral izquierdo del margen paralelo de la Zona de Falla Liquiñe Ofqui (ZFLO) (Cembrano *et al.*, 1996 *in* Lara, 2004) durante el Cuaternario. La ZFLO es una estructura de primer orden que se extiende por más de 1.200 km en dirección N10°E (Cembrano *et al.*, 1996 *in* Vera, 2018; Rosenau *et al.*, 2006 *in* Vera, 2018) donde el área en que se ubica el volcán Villarrica es encontrado desplazado 15-18 km hacia el E (Moreno, 1993 *in* Vera, 2018).

Cembrano & Moreno (1999) *in* Lara (2004) a partir de un modelo para un régimen cinemático, proponen un dominio compresivo dentro del arco volcánico que es afectado por un régimen de cizalle dextral durante el Cuaternario, por lo que, una estructura NW-SE puede tener un desplazamiento sinistral inverso, aunque no existe evidencia directa del desplazamiento.

Los datos sísmicos muestran una clara nucleación de eventos poco profundos a lo largo de una falla con tendencia NW, lo cual permite inferir un rol activo para este segmento.

Finalmente, el volcán Villarrica presenta en sus flancos, alineados en dirección NE, los centros eruptivos menores del Grupo Chaillupén y Grupo Los Nevados acoplados según con el campo de estrés actual (Cembrano & Lara, 2009 *in* Vera, 2018).

4. ÁRBOL PROBABILÍSTICO DEL VOLCÁN VILLARRICA

El objetivo específico de este capítulo es determinar la probabilidad de ocurrencia y las zonas de afectación de los principales fenómenos volcánicos a través de la confección y uso de un árbol probabilístico del volcán Villarrica. Esto para su uso por parte de funcionarios (como personal de municipalidades locales, de la ONEMI o del Comité Operativo de Emergencia o COE) encargados de la planificación y gestión de emergencias del volcán Villarrica. Este producto es elaborado también para su integración con otros productos de peligro o amenaza volcánica elaborado en este trabajo, o para su consulta directa.

4.1. Nodos del Árbol Probabilístico

La estructuración del árbol probabilístico del volcán Villarrica se basa en una modificación de la propuesta realizada por Newhall & Hoblitt (2002), de la cual se seleccionan y simplifican sus nodos. Considera la información disponible del registro histórico del volcán Villarrica y la información que puede ser de interés para los usuarios no especializados, dando respuesta a preguntas como: ¿qué fenómenos volcánicos ocurren? ¿Por dónde se extienden? ¿Con qué frecuencia ocurren? Por lo tanto, nodos como el *origen* (si es magmático o freático) y la *magnitud* (IEV) no son considerados debido, además, a que la mayoría de las erupciones del volcán Villarrica son de origen magmático y son de magnitud IEV=2, con solo dos registros de erupciones IEV=3. Por otro lado, erupciones IEV mayores han ocurrido hace al menos 3.700 años AP y se conocen solo pocos casos emblemáticos. Por lo tanto, una cantidad baja de registros de erupciones de IEV>2 y freatomagmáticas no proporcionan un mínimo de datos para generar un tratamiento probabilístico aceptable por sí solos para definir nodos independientes. Además, el Villarrica es un volcán que está permanentemente activo, por lo que el nodo de *disturbio* tampoco es considerado. Finalmente, los nodos de *exposición* y *vulnerabilidad* tampoco son considerados para el árbol probabilístico. Sin embargo, el análisis de la exposición en el volcán Villarrica es tratado de otra manera en el capítulo 5.

Finalmente, los nodos seleccionados son *fenómeno volcánico*, *sector* e *impacto* los cuales son definidos y descritos en subcapítulos siguientes.

4.2.1. Condición Inicial

La probabilidad $P(1)$ se define como la probabilidad de ocurrencia de una erupción. Presenta nodos binarios: *ocurre o no ocurre*. En este trabajo se asume como condición inicial que la ocurrencia de erupción es del 100%, puesto que el propósito es calcular la probabilidad de los nodos posteriores condicionales a una erupción en curso. De este modo el árbol puede ser complementado con mapas de amenaza y de peligro, los cuales asumen también tal condición inicial.

4.1.2. Nodo de Fenómeno Volcánico

El nodo de fenómeno volcánico $P(2|1)$ se define como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno volcánico, dado que una erupción está en curso. Los fenómenos son: *lahares, flujos de lava, caída de tefra, proyectiles balísticos y flujos piroclásticos*. Estos nodos se escogieron considerando que estos fenómenos volcánicos son recurrentes en el volcán Villarrica, excepto los flujos piroclásticos; sin embargo, a pesar de que este tipo de fenómeno es infrecuente y, por lo tanto, la calidad del tratamiento probabilístico se ve afectado para este fenómeno en particular, Newhall & Hoblitt (2002) recomienda incluirlo por ser un evento de alto impacto, puesto que recuerda que eventos raros como los ocurridos en *Mount Helena* y *Mount Pinatubo* son posibles y, por lo tanto, no deben ser ignorados. Cada fenómeno volcánico posee naturaleza diferente e impacta a la sociedad de modos diferentes y, potencialmente, todos pueden causar un daño en los sectores aledaños al volcán, por lo que conocer su naturaleza y sus probabilidades de ocurrencia son fundamentales para la toma de decisiones en caso de una emergencia volcánica.

4.1.3. Nodo de Sector

El nodo de sector $P(3|2)$ se define como la probabilidad de ocurrencia de que un fenómeno volcánico determinado se oriente hacia un sector determinado, dado que el fenómeno volcánico está en curso. Los nodos son sector *Pucón, Coñaripe y Palguín* (Fig. 4.1), los cuales representan sectores que dividen los cursos de los ríos y esteros. El sector Pucón contiene los cursos que tienden hacia el N-NW como el río Turbio, río Pedregoso, estero Zanjón Seco, estero Candelaria, estero Correntoso, estero Molco, estero Huichatio y río Voipir, los cuales desembocan directamente sobre el lago Villarrica, con excepción del río Voipir el cual continúa hacia el W. El sector Coñaripe

contiene los cursos que tienden hacia el S-SW como el estero Chaillupén, estero Diuco y río El Venado, los cuales desembocan directamente sobre el lago Calafquén. El sector Palguín contiene los cursos que tienden hacia el E como las quebradas que conectan con el río Palguín.

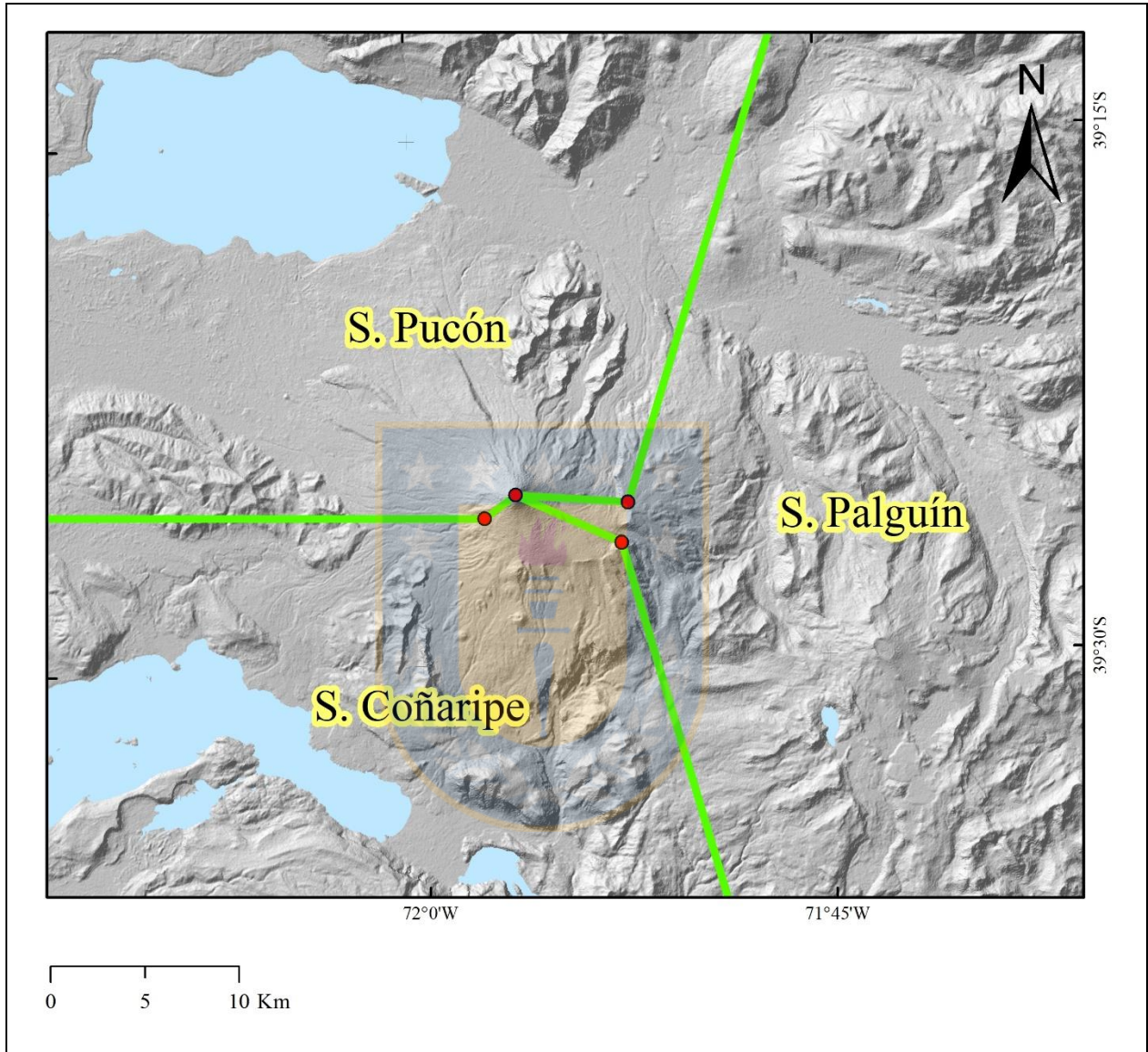


Figura 4.1: Mapa de nodo de sector del volcán Villarrica. Divisores de los sectores Coñaripe, Pucón y Palguín (líneas verdes). Coordenadas geográficas que guían la confección de los divisores (puntos rojos). Entre los sectores Coñaripe y Pucón se traza desde el cráter (71,94 W, 39,42 S) hasta el punto (71,96 W, 39,43 S); luego una línea azimuth 270° la cual pasa por cerro Cudico. Entre los sectores Pucón y Palguín se traza desde el cráter hasta el punto (71,87 W, 39,42 S); luego una línea azimuth 17,35° la cual pasa por la cima del cerro de Santa María de Caburgua. Entre los sectores Coñaripe y Palguín se traza desde el cráter hasta el punto (71,87 W, 39,44 S); luego una línea azimuth 163,40° la cual pasa Llancahue Alto.

Este nodo es definido debido a que los fenómenos volcánicos como los lahares y los flujos de lavas son fuertemente influenciados por la topografía, lo común es que la tendencia de éstos sea a extenderse a lo largo de los cursos de los ríos, esteros y quebradas en general. En el volcán Villarrica la orientación de estos fenómenos dependen, en parte, de las barreras topográficas relacionadas con la formación de antiguas calderas en las zonas más próximal del volcán. En el caso de los flujos de lava, también la orientación depende del sector en que se forman fisuras durante la erupción. Por otra parte, la orientación de las caídas de tefra son fuertemente influenciada por la dirección de los vientos, los cuales, predominantemente tienen sentido hacia el S-SE y coinciden con la segmentación del sector Palguín. Por otra parte, los proyectiles balísticos, que no son afectados por la topografía, ni por los vientos, se consideran que su orientación es hacia cualquiera de los tres sectores si ocurre el fenómeno. Finalmente, eventos de flujos piroclásticos ocurridos tienen descritos claramente su orientación en el registro histórico y son estas especificaciones las consideradas para este trabajo, a pesar de que la influencia de la topografía no es tan relevante en este tipo de fenómenos volcánicos, como se puede inferir del modelo de Jorquera (2018) (para más detalle consultar el subcapítulo 5.2.1).

Los divisores de cada sector representan una agrupación de múltiples quebradas. Debido a que, a pesar de que en eventos eruptivos más recientes se puede conocer específicamente los cursos de lahares y flujos de lavas, para erupciones más antiguas no. Es decir, una subdivisión de mayor detalle, por ejemplo, entre el estero Zanjón Seco y Correntoso, implica un aumento de la incertidumbre de la probabilidad de inundación de estos fenómenos en eventos más antiguos. Entonces la definición de los sectores es una compensación considerando el mayor detalle de la información disponible. Del mismo modo, información aún más detallada de los cursos específicos de lahares dentro de valles glaciares como el de Zanjón Seco, ejemplo, el estero Nalcadero o Zanjón de la Maestranza, tampoco son especificados por la insuficiencia de información respecto a éstos.

Las líneas divisoras son rectas y convergen en el cráter del volcán (Fig. 4.1), sin embargo, en la zona de impacto proximal (definido en el siguiente subcapítulo) las líneas divisoras presentan una desviación para representar más fielmente la división de las quebradas proximales que se orientan hacia un sector u el otro. Esto resulta en zonas con áreas significativamente mayores para el sector Pucón y Coñaripe en comparación con el sector Palguín. Sin embargo, esta diferencia no representa un perjuicio relevante en los resultados del árbol probabilístico.

4.1.4. Nodo de Impacto

El nodo de impacto P(4|3) es definido como la probabilidad de ocurrencia de que un fenómeno volcánico alcance un impacto significativo sobre una zona, dado que tal fenómeno volcánico está orientado hacia un sector determinado. Los nodos son impacto *proximal*, *medio* y *distal* (Fig. 4.2), los cuales son definidos según la geomorfología y características de los peligros volcánicos.

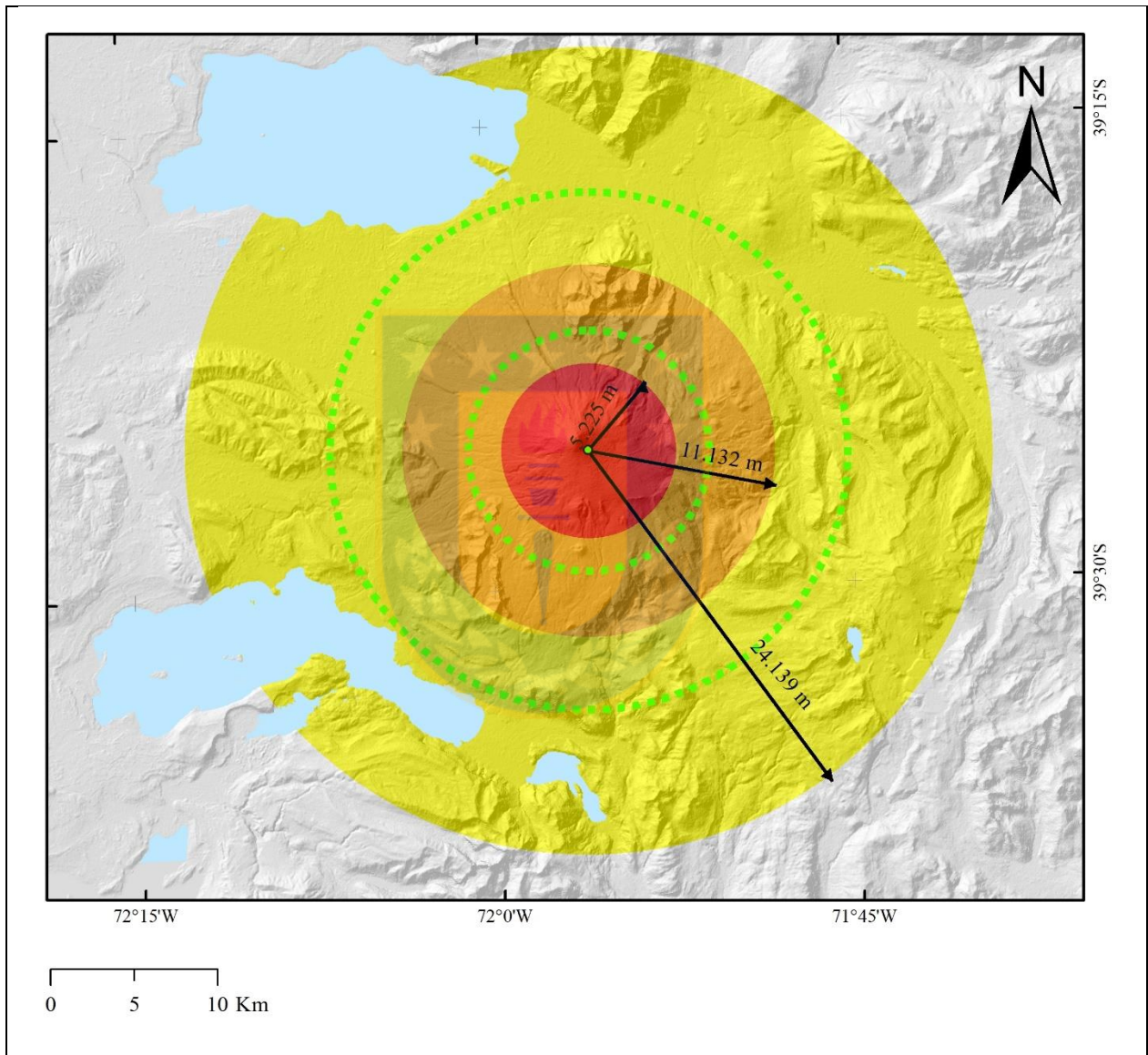


Figura 4.2: Mapa de nodo de impacto del volcán Villarica. El punto verde (71,93 W, 39,43 S) es el centro de las zonas de impacto. Zona de impacto proximal (rojo), radio 5.225 m. Zona de impacto medio (naranja), radio 11.132 m. Zona de impacto distal (amarillo), radio 24.139 m. Extensión del tercio de la diferencia de los radio entre los divisores de las zonas de impacto (línea verde discontinua). El radio se mide desde el centro hasta el límite de cada zona utilizando *ArcGis* 10.6.

Que el nodo de impacto de un fenómeno volcánico se defina según el alcance de su impacto significa que: para determinar si un evento es utilizado en los cálculos de probabilidad de la zona de impacto, éste debe haber causado efectos destructivos a su paso. Por ejemplo, los lahares deben haber causado inundaciones laterales o daños en infraestructura. En otras palabras, no se considera como eventos de la zona de impacto distal o medio los lahares que desembocan en los lagos sin haber causado algún impacto destructivo en su camino. Respecto a otros fenómenos volcánicos, como: los flujos de lava, proyectiles balísticos y flujos piroclásticos, se sobreentiende que el alcance reportado de estos fenómenos tiene el potencial de causar un impacto por donde pasan. Respecto a la caída de tefra, se considera que la acumulación de al menos 10 cm de tefra es suficiente para generar un impacto importante sobre la vida de las personas.

Además, tanto para las zonas de impacto medio y distal, se considera que un fenómeno volcánico alcanza un impacto significativo si al menos alcanza un tercio de la diferencia de los radios entre los divisores que lo limitan. Esto aplicado a los fenómenos de lahares, flujos de lava, proyectiles balísticos y flujos piroclásticos (Fig. 4.2). Por ejemplo, la diferencia entre los radios de la zona de impacto media y proximal es 5.907 m ($11.132 \text{ m} - 5.225 \text{ m}$), el tercio de la diferencia es 1.969 m ($5.225 \text{ m} / 3$). Por lo tanto, el impacto reportado por el paso de un fenómeno volcánico debe al menos alcanzar un radio de 7.194 m ($1.969 \text{ m} + 5.225 \text{ m}$) para ser considerado de la zona de impacto medio. Por otra parte, para la caída de tefra es considerado que alcanza un impacto significativo en una zona si al menos cubre un tercio del área comprendida en las zonas de impacto medio o distal. Estos criterios son establecidos debido a que, si un fenómeno volcánico apenas toca o traspasa el límite de la zona de impacto, resulta difícil justificar que ese evento sea representativo de dicha zona, puesto que abarcan muy poca extensión de esta.

4.1.4.1. Nodo de Impacto Proximal

La zona de impacto proximal (Fig. 4.3) está contenida en una forma circular simplificada que comprende: (1) la zona de escarpe S y SE asociado a la formación de calderas del volcán, las cuales forman barreras topográficas. (2) Los límites del alcance de los proyectiles balísticos (un radio de 3 km alrededor del cráter). (3) Zona de alta incertidumbre de conocer el curso de los fenómenos volcánicos que depende de la topografía, como lahares y flujos de lavas. (4) La zona 1 de las corrientes de densidad piroclástica definida por Jorquera (2018) (para más detalle consultar el

subcapítulo 5.2.1). Esta zona comprende una densidad de infraestructura menor comparativamente a las otras. Sin embargo, es una zona turística, por lo que es esperable que la población sea relativamente mayor en esta zona en temporada de turismo alta, como en vacaciones o feriados.

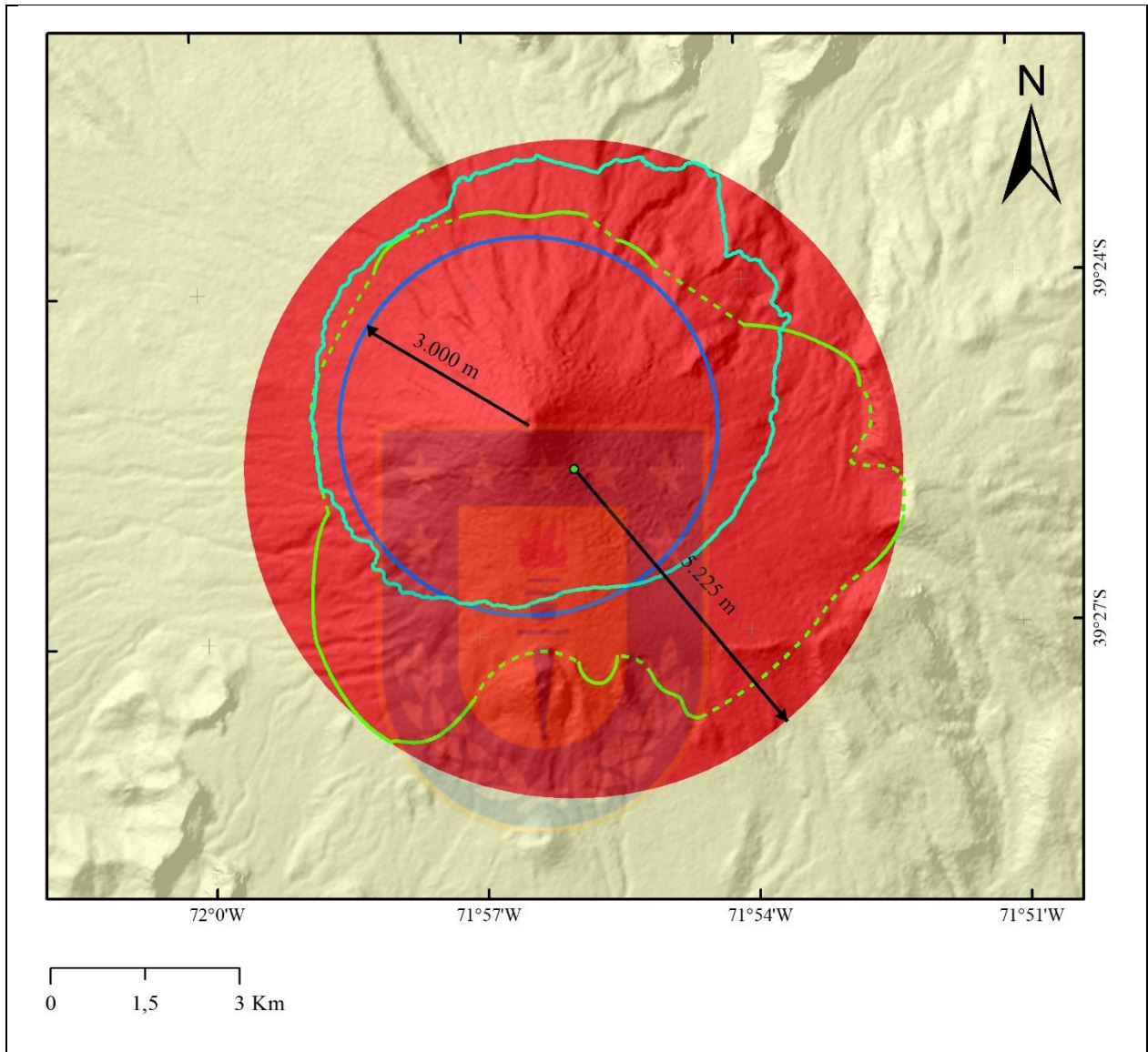


Figura 4.3: Mapa de trazado de la zona de impacto proximal. Zona de impacto proximal (rojo). Línea verde continua representa los límites de la zona donde los cursos de los lahares y flujos de lava son difíciles de determinar con precisión. Línea verde discontinua une los trazos verdes para formar un polígono cerrado. Línea azul representa la extensión radial (3 km) de los proyectiles balísticos. Línea celeste representa la extensión de las corrientes de densidad piroclásticas, elaborado por Jorquera (2018).

4.1.4.2. Nodo de Impacto Medio

La zona de impacto medio (Fig. 4.4) está contenida dentro de una forma circular simplificada que incluye aproximadamente los valles glaciares por donde los fenómenos volcánicos, como lahares y flujos de lava, presentan posibles inundaciones acotadas entre cerros. Hacia el S-SE el límite coincide aproximadamente con las quebradas de los ríos Palguín y El Venado. La zona de impacto medio se traza priorizando una mejor coincidencia hacia el NW y SW, por la importancia de los sectores Pucón y Coñaripe.

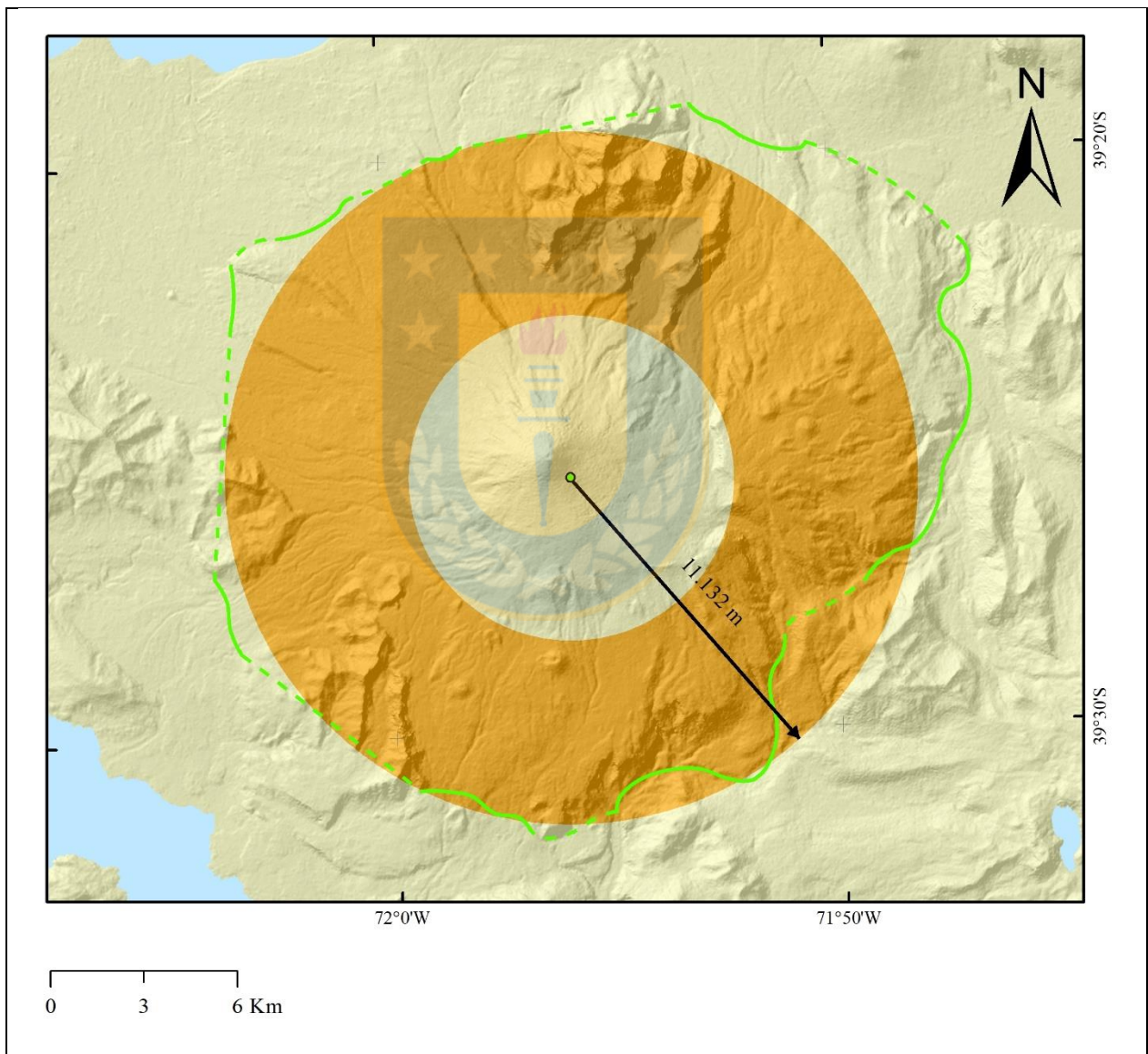


Figura 4.4: Mapa de trazado de la zona de impacto medio. Zona de impacto medio (naranja). Línea verde continua representa el trazado por donde terminan los valles glaciares. Línea verde discontinua une el trazado para formar un polígono cerrado.

Un fenómeno volcánico en curso debe causar un impacto dentro de al menos un radio de 7.194 m para ser considerado de la zona de impacto medio. Esta zona comprende una densidad de infraestructura mayor comparativamente a la zona de impacto proximal y menor a la zona de impacto distal. Los valles que suben las laderas del volcán suelen estar pobladas por lugareños u trabajadores. Por lo tanto, es esperable encontrar población permanente en cualquier momento del año. También están ubicados dentro de la zona algunos sitios críticos, como lugares de interés turístico o escuelas.

4.1.4.3. Nodo de Impacto Distal

La zona de impacto distal (Fig. 4.5) está contenida dentro de una forma circular simplificada que delimita el alcance máximo de la zona 3 de lahares definida por Álvarez (2020) (para más detalle consultar el subcapítulo 5.2.1). La zona de impacto distal se define como el límite donde ningún fenómeno volcánico puede sobrepasar más allá, con excepción de la caída de tefra. Además, la zona de impacto distal cumple con el rol de permitir calcular la extensión del tercio de la diferencia del radio de afectación entre la zona de impacto medio y distal. También, permite calcular las probabilidades de la caída de tefra (subcapítulo 4.3) en la zona de impacto distal.

Un fenómeno volcánico debe sobrepasar su impacto hasta alcanzar al menos un radio de 15.467 m (cerca del aeródromo de Pucón) para ser considerado de la zona de impacto distal. Esta zona comprende llanuras aledañas a los lagos, por lo tanto, presentan áreas portencialmente de ser afectadas por amplias inundaciones. Esta zona presenta una densidad de infraestructura mucho mayor a las zonas de impacto proximal y medio, puesto que están ubicado ahí los centros urbanos, como la ciudad de Pucón o el balneario de Coñaripe. Por lo tanto, es esperable encontrar población permanente en cualquier momento del año. También están ubicados la mayor parte de los sitios críticos, especialmente de servicios (escuelas, hospitales, etc.) y, además, alojamientos para visitantes.

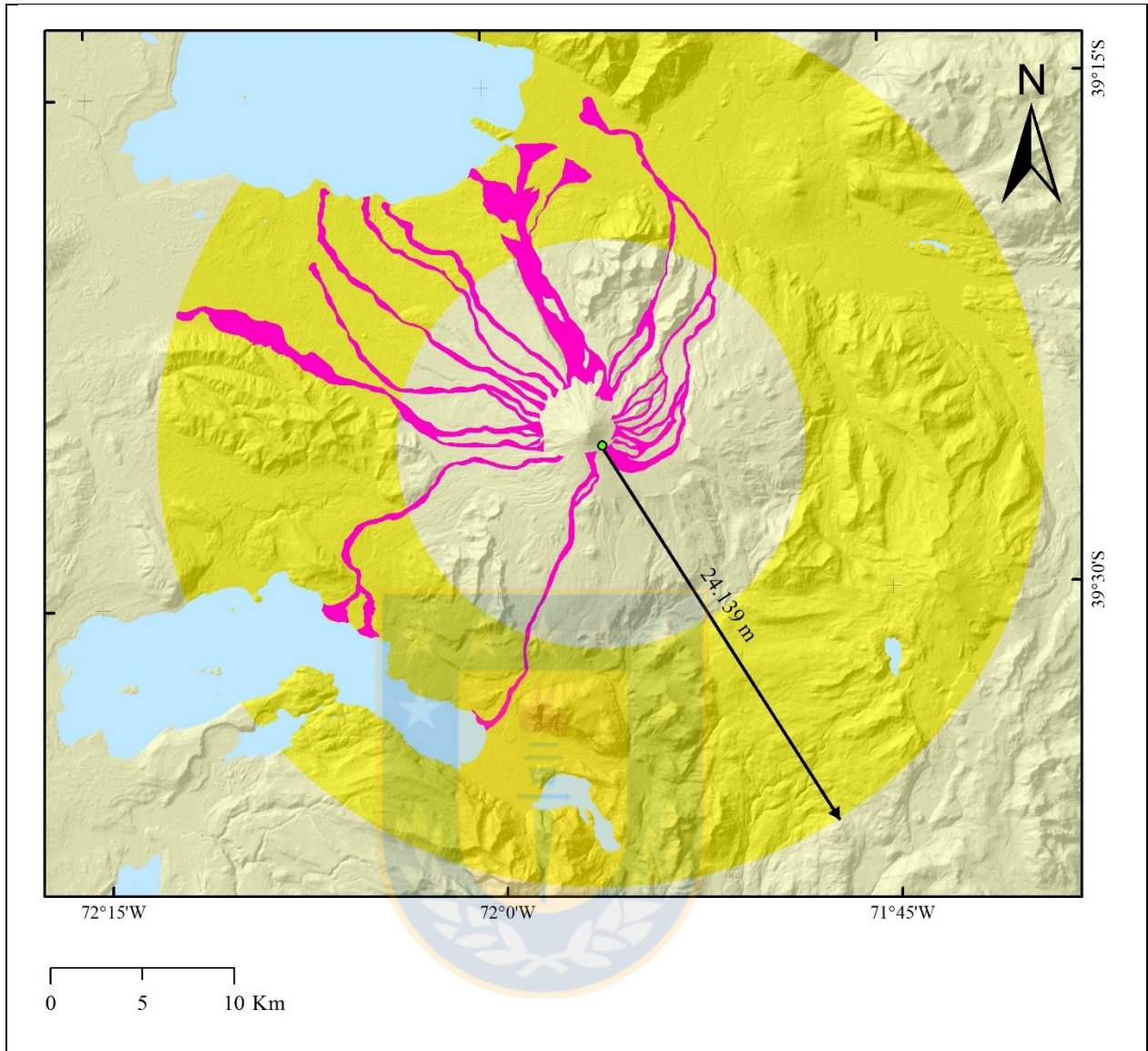


Figura 4.5: Mapa de trazado de la zona de impacto distal. Zona de impacto distal (amarillo). Polígono rosado representa la inundación de lahares (Álvarez, 2020).

4.2. Actividad Eruptiva Histórica del Volcán Villarrica

Tal como se ha mencionado la confección del árbol probabilístico se realiza con base en los criterios que se definen para la elección de sus nodos y además del registro de la actividad eruptiva histórica local. No se consideran los eventos prehistóricos dentro de los cálculos de las probabilidades con base al uso de la inferencia bayesiana. Esto debido a que los únicos eventos prehistóricos registrados son las ignimbritas de hace 3,7 ka años AP y 13,9 ka años AP. Considerando que, probablemente una gran cantidad de eventos menores ocurrieron entre éstos dos

y, éstos no se conservaron en la estratigrafía, resultaría en un sesgo alto a favor de las probabilidades de ocurrencia de los eventos mayores en el caso de incluirlos en los cálculos.

Por otro lado, los datos del registro histórico del volcán Villarrica son suficientemente completos y detallados, para no recurrir a comparaciones con otros volcanes análogos. Por lo tanto, se recolectan y evalúan los registros de la actividad eruptiva del volcán Villarrica de los siguientes trabajos anteriores, los cuales contienen los registros más completos:

Petit-Breulih (1994) realiza su registro histórico basado en la revisión bibliográfica de cronistas, viajeros, misioneros e investigadores, en diarios, revistas, documentos públicos y privados, y en la cartografía disponible. Confecciona un marco completo y amplio de la ocurrencia de varios fenómenos volcánicos desde 1558 hasta 1984, sin embargo, las descripciones de las erupciones, especialmente las más antiguas son por lo general subjetivas, además es común la ocurrencia de confusiones geográficas de quienes las describen y en algunos casos se desconoce la fuente originaria.

Dzierma & Wehrmann (2010) realizan una selección utilizando registros históricos anteriores de erupciones del volcán Villarrica, supuestamente, utilizando criterios objetivos, aunque no son especificados cuáles son, y agregan registros nuevos hasta 2008. No especifican tampoco sus fuentes de información.

Van Daele *et al.* (2014) confeccionan un registro eruptivo con las evidencias encontradas en columnas de sedimento en los lagos Villarrica y Calafquén, cuyas edades son determinadas utilizando conteo de varvas y dataciones mediante análisis de radionucleidos de ^{210}Pb y ^{137}Cs . Los autores establecen que para que un registro en los sedimentos se hubiese conservado, el IEV de la erupción debiese ser al menos 2, sin embargo, existen excepciones de eventos relativamente recientes, de IEV=1, y bien documentados como los de 1980 y 1991 que tienen registros en los sedimentos de los lagos. Por otra parte, los autores definen tres tipos de capas encontradas en los lagos: (1) tefra directamente caída sobre el lago; (2) arcillas finas rica en Fe, interpretadas como eventos eruptivos retrabajados; y (3) depósitos de lahares. Estos últimos registros no son información totalmente confiable, puesto que los autores interpretan un depósito de lahar ocurrido en 1991, el cual nunca fue registrado en ningún monitoreo volcánico. A pesar de las excepciones anteriores, por lo general, los eventos establecidos por los autores de este trabajo se condicionan

con otros registros y monitoreos volcánicos, por lo tanto, resultan útiles para complementar la información de caída de tefra y lahares, especialmente para los registros más antiguos.

De estas tres fuentes de información se seleccionan los eventos eruptivos (Tabla 1 *in* Anexo 1) según los siguientes criterios: se seleccionan solo las erupciones $IEV \geq 2$, puesto que las erupciones más pequeñas tienen menores probabilidades de que sus depósitos se conserven en el registro sedimentario o que hubiesen sido percibidas por algún observador, ya sea por condiciones climáticas adversas, o porque, antiguamente, no había instrumentación para monitoreo. Además, se debe considerar que muchos registros con $IEV=1$ podrían no ser necesariamente erupciones, sino que cambios en la actividad explosiva dentro del cráter que fueron percibidos como tal por observadores. De considerar erupciones de magnitud pequeña proporcionaría, por lo tanto, un sesgo a favor de las características de los eventos más grandes y en contra de los eventos más pequeños.

Hay información que no se corresponde totalmente entre una fuente y otra, por tanto, se utilizan los siguientes criterios: en términos generales se consideran erupciones $IEV=2$ aquellas que contienen un registro sedimentario en alguno de los lagos y, en cambio, $IEV=1$ a los que no poseen tal registro tal como propone Van Daele *et al.* (2014). Excepto las erupciones de 1991, 1980, 1915, 1906, 1874, 1780, 1759 y 1594 son consideradas $IEV=1$ a pesar de tener registro sedimentario en alguno de los lagos, porque de sus descripciones en otras fuentes se desprende una magnitud menor en estos eventos. Las erupciones de 1921 y 1907 son consideradas $IEV=2$ a pesar de no tener registro sedimentario en ninguno de los lagos, porque de sus descripciones en otras fuentes se desprende una magnitud mayor de estos eventos. Las erupciones de 1640 y 1948 son consideradas las únicas con $IEV=3$ por la magnitud de sus eventos.

Por otra parte, se descartan todas aquellas erupciones que, a pesar de que se observan evidencias de su ocurrencia en el sedimento de alguno de los lagos, no son encontrados en los registros de Petit-Breulih (1994); esto es debido a que son considerados solo los lahares originados en erupciones volcánicas, recordando que los lahares son aluviones que se generan en ambientes volcánicos, pero no necesariamente son desencadenados por una erupción.

El ciclo eruptivo de 1948 a 1949 se subdivide en dos eventos puesto que tiene dos fases paroxismales bien documentadas.

Finalmente, se agrega la última erupción ocurrida el 03 de marzo de 2015.

De la revisión y evaluación de los registros históricos, se obtiene una selección de 38 registros en total para la base de datos de este trabajo, los cuales se utilizan para la confección del árbol probabilístico (Tabla 1 *in* Anexo 1; Tabla 4.1).

Tabla 4.1: Actividad eruptiva histórica del volcán Villarrica. Resultado de la selección de eventos eruptivo del volcán Villarrica $IEV \geq 2$ a partir de los trabajos de Petit-Breuilh (1994), Dzierma & Wehrmann (2010) y Van Daele *et al.* (2014).

Año	IEV	Año	IEV	Año	IEV	Año	IEV	Año	IEV
1558	2	1742	2	1853	2	1907	2	1949	3
1562	2	1751	2	1869	2	1908	2	1963	2
1640	3	1787	2	1877	2	1909	2	1964	2
1647	2	1806	2	1879	2	1920	2	1971	2
1688	2	1815	2	1883	2	1921	2	1984	2
1716	2	1822	2	1893	2	1933	2	2015	2
1730	2	1832	2	1897	2	1938	2		
1737	2	1837	2	1904	2	1948	2		

Luego, se recolectan y evalúan información detallada de cada evento por cada uno de los principales fenómenos volcánicos ocurridos en el volcán Villarrica (Tabla 2 *in* Anexo 1):

De los artículos de Bertin *et al.* (2015), Naranjo (2015) y Vera (2018) se obtiene información detallada de todos los fenómenos volcánicos de la erupción del 03 de marzo 2015.

De Petit-Breuilh (1994) se obtiene también información detallada de cada fenómeno volcánico de las erupciones desde 1558 a 1984, como la orientación y el alcance de lahares, flujos de lava y flujos piroclásticos, así como la ocurrencia de proyectiles balísticos y caída de tefra. De este trabajo se descartan todos aquellos datos que se muestran como dudosos.

De Van Daele *et al.* (2014) se obtienen algunos detalles acerca de lahares y caída de tefra en los lagos Villarrica y Calafquén, desde 1558 a 1991, de este trabajo es posible establecer hacia qué lago se orientaron los lahares y sus alcances en todo el registro histórico (Tabla 4.2). Los datos de lahares se utilizan como criterio general, pero algunos datos no son considerados, puesto que no se correlacionan con la información de otras fuentes más confiables, como en las erupciones de 1963, 1938, 1920, 1908 y 1904. Es posible inferir la orientación de la caída de tefra asumiendo que las erupciones que son $IEV=2$ no tienen el suficiente potencial para que la columna eruptiva pueda

depositar directamente sobre los lagos Villarrica y Calafquén, en el caso de que durante dicha erupción los vientos están en dirección al sector de Palguín. Esto se asume con observaciones del modelo de Arias (2020).

Tabla 4.2: Lahares históricos del volcán Villarrica. Detalle de la ocurrencia de lahares en las erupciones seleccionadas para este trabajo. Los cuadrados son los lahares que se han orientado hacia el lago Villarrica y los círculos, hacia el lago Calafquén. Las figuras rellenas de color negro representan que fueron encontrado lahares en el sedimento del lago y, en blanco, que no fueron encontrados. La descripción del tamaño del lahar representa al de mayor tamaño que llega a la orilla del lago. Modificado de Van Daele *et al.* (2014).

Año	Tamaño lahar lago		Tamaño lahar lago
	Villarrica	Calafquén	
1971	■ ●	Mayor	Mayor
1964	■ ●	Reportado	Mayor
1963	■ ●	Incierto	Grande
1949	■ ●	Mayor	Mayor
1948	■ ●	Reportado	Reportado
1938	□ ○	Sin información	Sin información
1920	□	No llega	
1909	■	Incierto	
1908	■	Incierto	
1904	□	No llega	
1897	□	Sin información	
1893	■ ○	Sin información	Sin información
1879	□	Sin información	
1822	■ ●	Sin información	Sin información
1806	■	Sin información	
1787	□	Sin información	
1751	□	Sin información	
1730	■ ○	Sin información	Sin información
1716	■	Sin información	
1688	■ ●	Sin información	Sin información
1647	□	Sin información	
1640	□ ○	Sin información	Sin información
1562	■	Sin información	

De Flores (2014) se obtienen algunos datos acerca del alcance de las coladas de lava (Tabla 4.3).

Tabla 4.3: Antecedentes de dimensiones y alcance de distintas coladas de lava en el volcán Villarrica. Se detalla algunas características de las coladas de lava históricas: su IEV, distancia al cráter principal y dimensiones. Modificado de Flores (2014).

Colada de lava	IEV	Distancia al cráter principal (km)	Ancho (m)	Alcance (km)	Espesor (m)	Fuente
Zanjón Seco, 1787	2	1,1	60	13	-	Flores (2014)
Estero Diuco, 1921	2	6,3	850	18,5	.	Flores (2014)
Estero Molco, 1948	3	-	-	15	8-15	Moreno & Clavero (2006)
Estero Molco, 1948	3	1,3	530	12	-	Flores (2014)
Estero Diuco, 1964	2	5,4	600	6	-	Flores (2014)
Chaillupén, 1971	2	5,6	150	16,5	12,5	Contreras (2013)
Chaillupén, 1971	2	6,8	119	16,5	10,13	Contreras (2013)
Chaillupén, 1971	2	-	-	16,5	1-8	Moreno & Clavero (2006)
Chaillupén, 1971	2	2,1	200	16,5	-	Flores (2014)
Río Pedregoso, 1971	2	2,3	260	6	-	Flores (2014)
Río Pedregoso, 1971	2	1,2	150	3,8	-	Flores (2014)
Estero Candelaria, 1984	2	1,5	140	5,5	-	Flores (2014)

De Moreno & Clavero (2006) se obtienen algunos datos puntuales de caída de tefra, lahares, flujos de lava y un flujo piroclástico en la erupción de 1949. También se utiliza el mapa cartográfico de la Geología de Volcán Villarrica del SERNAGEOMIN como referencia espacial de varios fenómenos volcánicos (Fig. 3.1).

De Lara (2004) se obtiene información sobre altura la altura de las columnas eruptivas de varios de los eventos seleccionados. Esta información permite comparar los eventos del registro con el modelo elaborado por Arias (2020).

De Naranjo & Moreno (2004) y Castruccio *et al.* (2010) se obtienen algunos detalles acerca de los alcances de los lahares de 1971. Como es posible inferir, esta recolección y organización de la información tiene como objetivo poder desprender datos acerca la orientación y el alcance de cada fenómeno volcánico en cada evento del registro histórico.

4.3. Confección del Árbol Probabilístico

Primero se construye una base de dato organizada y seleccionada de la actividad histórica eruptiva del volcán Villarrica, delimitada según los nodos y criterios descritos en los subcapítulos anteriores (Tabla 3-7 *in* Anexo 1) donde se marca con X si corresponde, o un punto si no, dentro de las características de la columna de un nodo, de este modo facilitar los cálculos de probabilísticos descritos a continuación.

4.3.1. Cálculo de Probabilidades

A continuación se describe como se calcula las probabilidades de cada a través de un ejemplo:

Para calcular la probabilidad de que ocurran lahares en el sector Coñaripe dado que lahares ya están en curso, se realiza el siguiente procedimiento:

1) Se establece que 14 de cada 38 erupciones los lahares se orientan hacia el sector Coñaripe. Por lo tanto, $P(n)=0,37$ (14/38).

2) Incidentalmente, 24 de cada 38 erupciones no se orientan hacia el sector Coñaripe. Por lo tanto, $P(n')=0,63$ (24/38).

3) Evidentemente, $i=14$ eventos cumplen con la condición de que ocurren lahares dado que lahares ocurren en sector Coñaripe. Por lo tanto, $P(n-1|n)$ o $P(i)=1,00$ (14/14).

3) Luego, $i'=10$ eventos cumplen con la condición de que ocurren lahares dado que lahares no ocurren en sector Coñaripe. Por lo tanto, $P(n-1|n')$ o $P(i')=0,42$ (10/24).

5) Aplicando, entonces, la fórmula propuesta por Newhall y Hoblitt (2002):

$$p(n|n-1) = \frac{p(n-1|n) * p(n)}{p(n-1|n) * p(n) + p(n-1|n') * p(n')}$$

Se obtiene finalmente la probabilidad de $P(n|n-1)=0,58$.

Del mismo modo, se calcula la probabilidad individual de cada nodo y sus opciones (Tabla 4.4). Los nodos que no poseen una probabilidad, es debido a que no hay eventos en el registro histórico que cumplan con las condiciones de pertenecer a dicho nodo, lo que conlleva a vacíos de información que son determinados de otras maneras.

Tabla 4.4: Resultado de la inferencia bayesiana para el árbol probabilístico del volcán Villarrica. En las columnas se añade: cantidad de casos ocurridos (n), cantidad de casos no ocurridos (n'), total de casos (N), cantidad de casos ocurridos dado que el nodo anterior ocurre (i), cantidad de casos no ocurridos dado que el nodo anterior ocurre (i') y sus probabilidades respectivas. Se destaca en gris el resultado final, $P(\theta|\theta-1)$, el cual es la probabilidad que el evento θ ocurra, dado que el evento anterior ha ocurrido.

			n	n'	N	i	i'	P(n)	P(n')	P(i)	P(i')	P($\theta|\theta-1$)
		Erupción	38	0	38	-	-	1.00	0.00	-	-	1.00
		Lahares	24	14	38	24	14	0.63	0.37	1.00	1.00	0.63
		S. Pucón	24	14	38	24	0	0.63	0.37	1.00	0.00	1.00
		I. Proximal	24	14	38	24	0	0.63	0.37	1.00	0.00	1.00
		I. Medio	17	21	38	17	7	0.45	0.55	1.00	0.33	0.71
		I. Distal	5	33	38	5	19	0.13	0.87	1.00	0.58	0.21
		S. Coñaripe	14	24	38	14	10	0.37	0.63	1.00	0.42	0.58
		I. Proximal	14	24	38	14	0	0.37	0.63	1.00	0.00	1.00
		I. Medio	8	30	38	8	6	0.21	0.79	1.00	0.20	0.57
		I. Distal	4	34	38	4	10	0.11	0.89	1.00	0.29	0.29
		S. Palguín	0	38	38	0	24	0.00	1.00	-	0.63	-
		I. Proximal	0	38	38	0	0	0.00	1.00	-	0.00	-
		I. Medio	0	38	38	0	0	0.00	1.00	-	0.00	-
		I. Distal	0	38	38	0	0	0.00	1.00	-	0.00	-
		Flujos de lava	14	24	38	14	24	0.37	0.63	1.00	1.00	0.37
		S. Pucón	11	27	38	11	3	0.29	0.71	1.00	0.11	0.79
		I. Proximal	11	27	38	11	0	0.29	0.71	1.00	0.00	1.00
		I. Medio	3	35	38	3	8	0.08	0.92	1.00	0.23	0.27
		I. Distal	0	38	38	0	11	0.00	1.00	-	0.29	-
		S. Coñaripe	11	27	38	11	3	0.29	0.71	1.00	0.11	0.79
		I. Proximal	11	27	38	11	0	0.29	0.71	1.00	0.00	1.00
		I. Medio	3	35	38	3	8	0.08	0.92	1.00	0.23	0.27
		I. Distal	2	36	38	2	9	0.05	0.95	1.00	0.25	0.18
		S. Palguín	0	38	38	0	14	0.00	1.00	-	0.37	-
		I. Proximal	0	38	38	0	0	0.00	1.00	-	0.00	-
		I. Medio	0	38	38	0	0	0.00	1.00	-	0.00	-
		I. Distal	0	38	38	0	0	0.00	1.00	-	0.00	-
		Caída de tefra	37	1	38	37	1	0.97	0.03	1.00	1.00	0.97
		S. Pucón	4	34	38	4	33	0.11	0.89	1.00	0.97	0.11
		I. Proximal	0	38	38	0	4	0.00	1.00	-	0.11	-

Tabla 4.4 (continuación): Resultado de la inferencia bayesiana para el árbol probabilístico del volcán Villarica.

			n	n'	N	i	i'	P(n)	P(n')	P(i)	P(i')	P(θ|θ-1)
		I. Medio	0	38	38	0	4	0.00	1.00	-	0.11	-
		I. Distal	0	38	38	0	4	0.00	1.00	-	0.11	-
		S. Coñaripe	5	33	38	5	32	0.13	0.87	1.00	0.97	0.14
		I. Proximal	0	38	38	0	5	0.00	1.00	-	0.13	-
		I. Medio	0	38	38	0	5	0.00	1.00	-	0.13	-
		I. Distal	0	38	38	0	5	0.00	1.00	-	0.13	-
		S. Palguín	29	9	38	29	8	0.76	0.24	1.00	0.89	0.78
		I. Proximal	0	38	38	0	29	0.00	1.00	-	0.76	-
		I. Medio	0	38	38	0	29	0.00	1.00	-	0.76	-
		I. Distal	0	38	38	0	29	0.00	1.00	-	0.76	-
		Proyec. Balísticos	32	6	38	32	6	0.84	0.16	1.00	1.00	0.84
		S. Pucón	32	6	38	32	0	0.84	0.16	1.00	0.00	1.00
		I. Proximal	32	6	38	32	0	0.84	0.16	1.00	0.00	1.00
		I. Medio	0	38	38	0	32	0.00	1.00	-	0.84	-
		I. Distal	0	38	38	0	32	0.00	1.00	-	0.84	-
		S. Coñaripe	32	6	38	32	0	0.84	0.16	1.00	0.00	1.00
		I. Proximal	32	6	38	32	0	0.84	0.16	1.00	0.00	1.00
		I. Medio	0	38	38	0	32	0.00	1.00	-	0.84	-
		I. Distal	0	38	38	0	32	0.00	1.00	-	0.84	-
		S. Palguín	32	6	38	32	0	0.84	0.16	1.00	0.00	1.00
		I. Proximal	32	6	38	32	0	0.84	0.16	1.00	0.00	1.00
		I. Medio	0	38	38	0	32	0.00	1.00	-	0.84	-
		I. Distal	0	38	38	0	32	0.00	1.00	-	0.84	-
		Flujos piroclásticos	2	36	38	2	36	0.05	0.95	1.00	1.00	0.05
		S. Pucón	2	36	38	2	0	0.05	0.95	1.00	0.00	1.00
		I. Proximal	2	36	38	2	0	0.05	0.95	1.00	0.00	1.00
		I. Medio	0	38	38	0	2	0.00	1.00	-	0.05	-
		I. Distal	0	38	38	0	2	0.00	1.00	-	0.05	-
		S. Coñaripe	1	37	38	1	1	0.03	0.97	1.00	0.03	0.50
		I. Proximal	1	37	38	1	0	0.03	0.97	1.00	0.00	1.00
		I. Medio	0	38	38	0	1	0.00	1.00	-	0.03	-
		I. Distal	0	38	38	0	1	0.00	1.00	-	0.03	-
		S. Palguín	0	38	38	0	2	0.00	1.00	-	0.05	-
		I. Proximal	0	38	38	0	0	0.00	1.00	-	0.00	-

Tabla 4.4 (continuación): Resultado de la inferencia bayesiana para el árbol probabilístico del volcán Villarrica.

			n	n'	N	i	i'	P(n)	P(n')	P(i)	P(i')	P(0|0-1)
		I. Medio	0	38	38	0	0	0.00	1.00	-	0.00	-
		I. Distal	0	38	38	0	0	0.00	1.00	-	0.00	-

Para poder completar los datos vacíos del árbol probabilístico, en el caso del nodo de impacto de caída de tefra, se estiman sus probabilidades condicionales (Tabla 4.5) utilizando el modelo de probabilidad de excedencia de acumulación de 10 cm de tefra en una erupción IEV=3-4 elaborado por Arias (2020) (subcapítulo 5.2.1). Se usa este modelo debido a que es la mejor información disponible para utilizar con este propósito, el cual también se utiliza para otros análisis dentro de este trabajo. Las áreas que envuelven las isopleas del modelo se intersecan con las áreas producto de la unión de los nodos de sector e impacto. Cada curva de probabilidad envuelve un área determinada de cada zona de afectación donde se calcula un tercio del área total de la zona. Luego, se identifica que probabilidad está asociada a ese tercio del área en específico. Se considera que para las zonas de impacto proximal de caída de tefra, para todos los sectores, la probabilidad de excedencia condicional es un 100%.

Tabla 4.5: Resultado de las probabilidades condicionales de la caída de tefra. Las áreas son obtenidas de la intersección de las áreas de las isopleas de probabilidad excedente con las áreas de las zonas de sector e impacto unidas. De ese modo es calculada la probabilidad de excedencia de un tercio del área (RES), destacado en gris.

Prob. Exc.	Sector Pucón		Sector Coñaripe		Sector Palguín	
	Área I. Medio	Área I. Distal	Área I. Medio	Área I. Distal	Área I. Medio	Área I. Distal
0	125.205.439	499.290.301	112.441.312	473.757.753	-	468.183.715
0.05	110.104.421	176.839.193	68.363.594	53.175.329	-	468.086.676
0.1	81.911.101	75.354.610	45.037.978	18.224.863	-	454.777.874
0.2	53.446.319	19.532.557	27.979.491	3.157.327	-	390.707.742
0.3	37.701.910	3.550.580	19.331.086	125.536	65.916.270	310.547.530
0.4	25.419.448	76.815	12.569.938	-	65.330.790	226.652.036
0.5	16.170.530	-	7.931.146	-	61.971.661	124.692.106
0.6	100.262.96	-	4.570.489	-	54.190.827	49.062.126
0.7	5.847.874	-	2.131.996	-	41.907.464	9.166.303
0.8	2.879.697	-	504.744	-	19.587.756	-
0.9	784.505	-	-	-	2.530.352	-
RES	0.27	0.06	0.14	0.04	0.79	0.47

Para completar la información con las probabilidades absolutas de aquellos nodos que todavía tienen vacíos de información, se estiman probabilidades derivadas de erupciones prehistóricas: Ignimbrita Licán e Ignimbrita Pucón. Asumiendo que ocurren erupciones cada 12 años, se realizan dos estimaciones posibles: del evento ocurrido hace 3.700 años, se estima que ocurre en 1 de cada 308 erupciones (0.32%); y del evento ocurrido hace 13.900 años, se estima que ocurre en 1 de cada 1.158 bloques de tiempo (0.09%). Esta estimación es necesaria, puesto que, a pesar de su imprecisión, es mejor comunicar que existe una probabilidad, aunque sea muy pequeña, que presentar un pronóstico imposible (es decir, 0%).

4.4. Resultados

Finalmente, es confeccionado el árbol probabilístico del volcán Villarrica (Fig. 4.6-4.10) con sus probabilidades condicionales, las frecuencias y sus probabilidades absolutas, según todos los criterios y estimaciones probabilísticas descritas en los subcapítulos anteriores. Se debe tener presente que la cantidad de eventos totales son de 38.

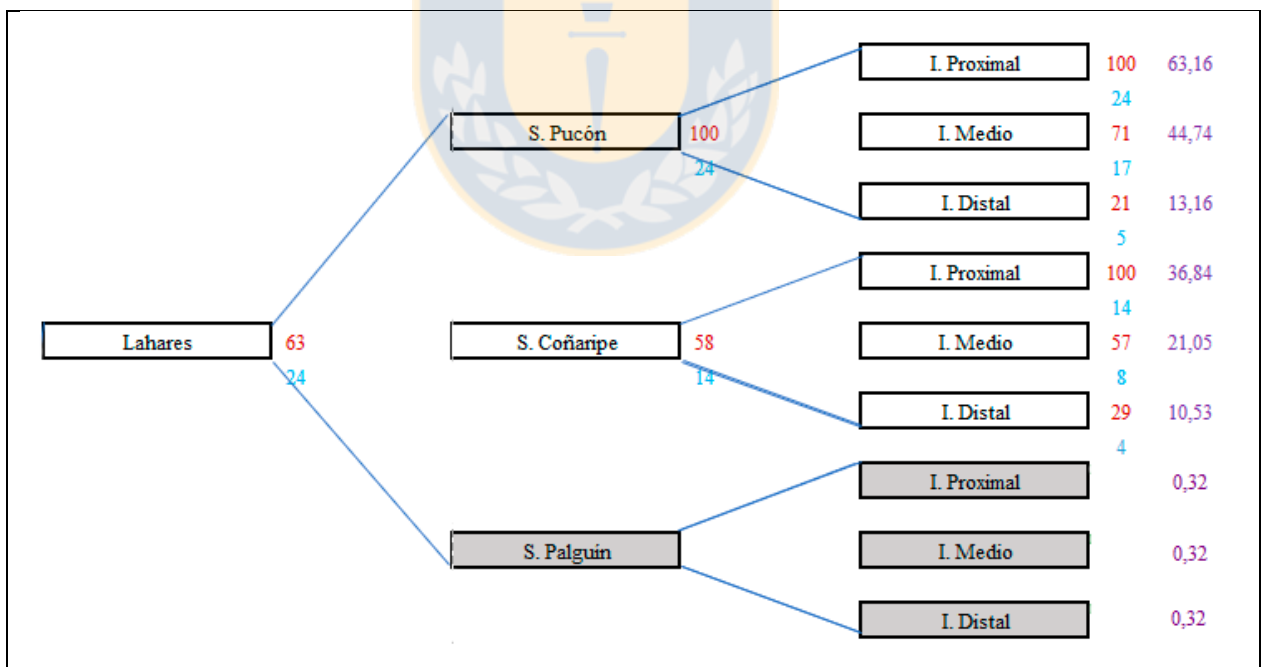


Figura 4.6: Árbol probabilístico de lahares del volcán Villarrica. En rojo la probabilidad condicional, en azul la cantidad de eventos ocurridos y en morado las probabilidades absolutas. En gris se resaltan los nodos los cuales no fueron posible calcular la probabilidad condicional por inferencia bayesiana.

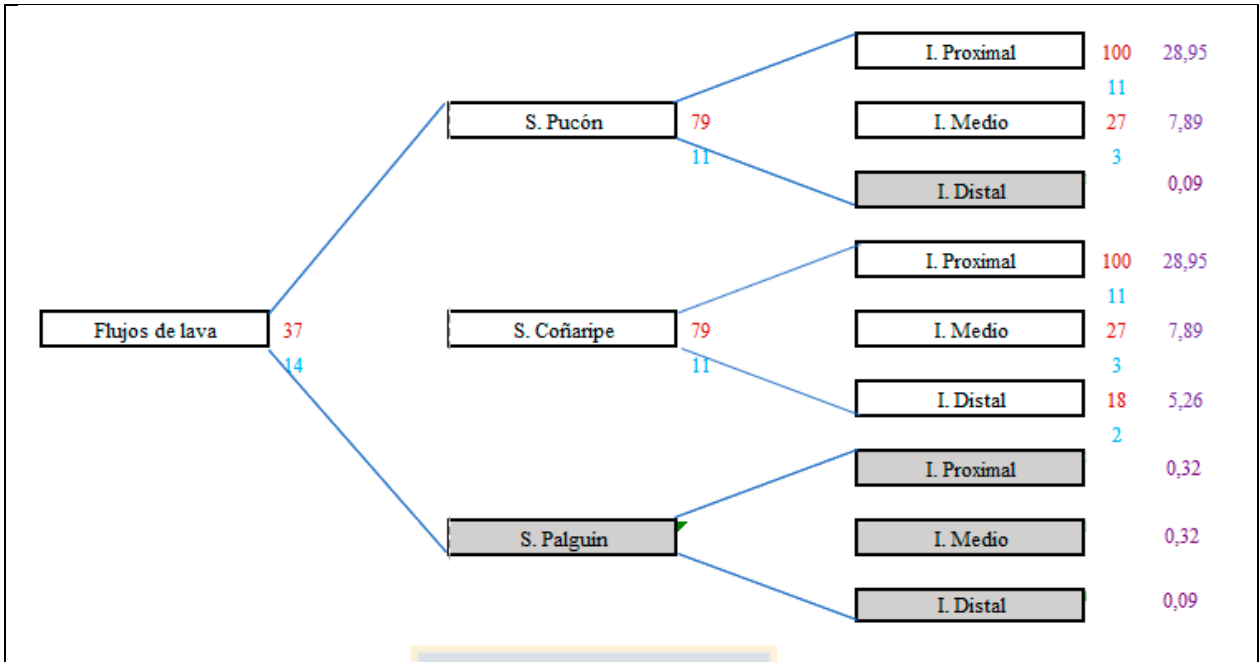


Figura 4.7: Árbol probabilístico de flujos de lava del volcán Villarrica. En rojo la probabilidad condicional, en azul la cantidad de eventos ocurridos y en morado las probabilidades absolutas. En gris los nodos los cuales no fueron posible calcular la probabilidad condicional por inferencia bayesiana.

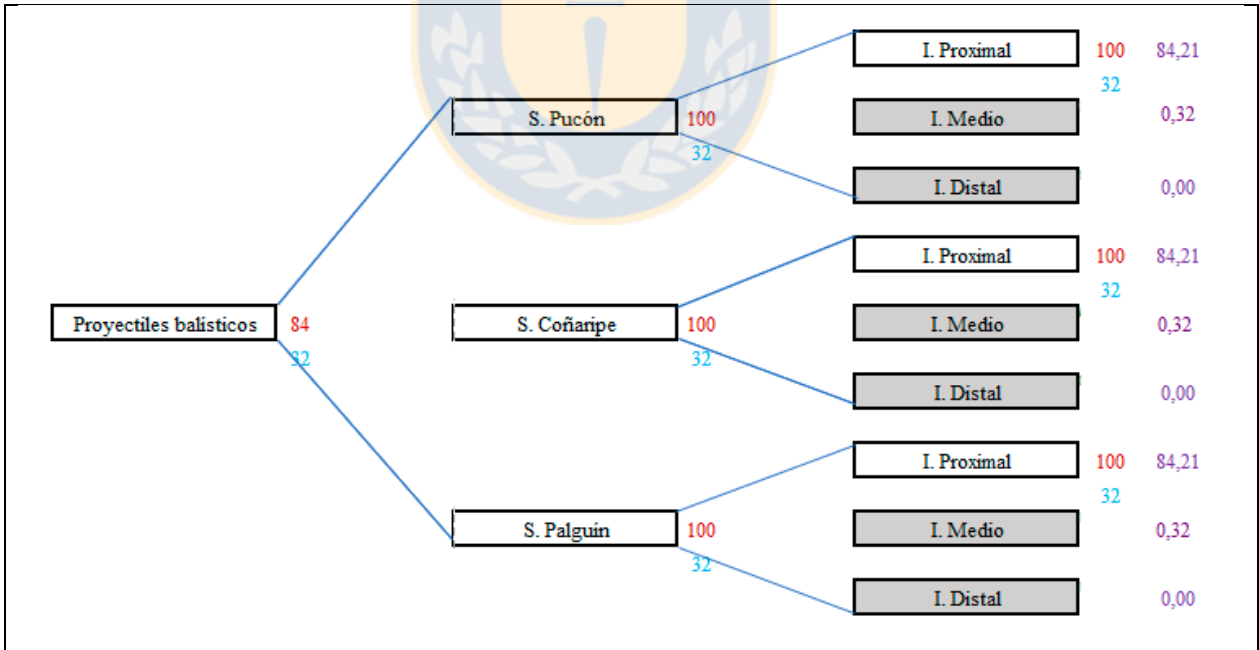


Figura 4.8: Árbol prob. de proyectiles balísticos del volcán Villarrica. En rojo la probabilidad condicional, en azul la cantidad de eventos ocurridos, en morado las probabilidades absolutas. En gris los nodos los cuales no fueron posible calcular la probabilidad condicional por inferencia bayesiana.

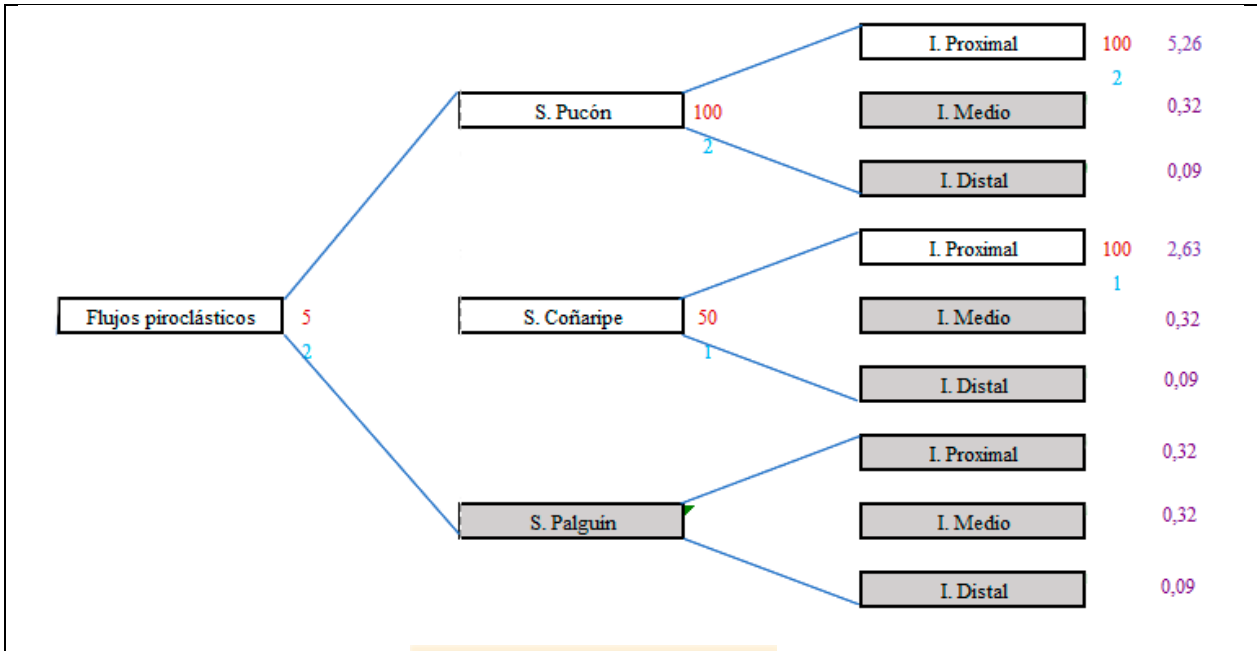


Figura 4.9: Árbol prob. de flujos piroclásticos del volcán Villarrica. En rojo la probabilidad condicional, en azul la cantidad de eventos ocurridos, en morado las probabilidades absolutas. En gris los nodos los cuales no fueron posible calcular la probabilidad condicional por inferencia bayesiana.

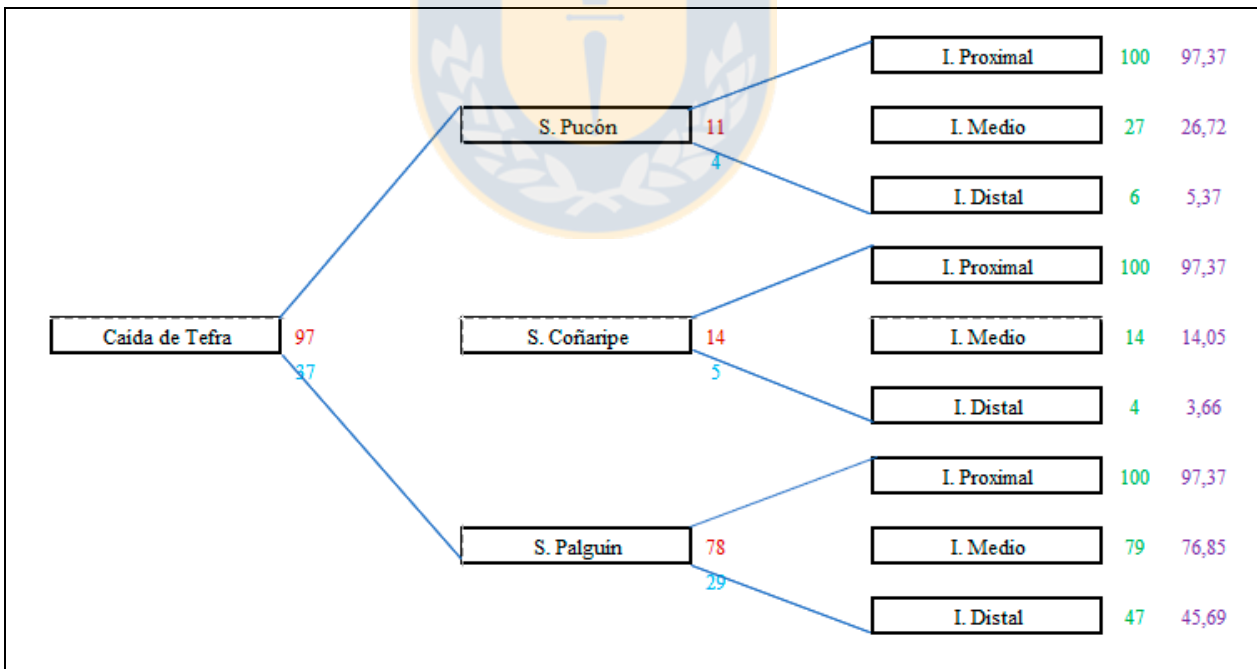


Figura 4.10: Árbol probabilístico de caída de tefra del volcán Villarrica. En rojo la probabilidad condicional, en azul la cantidad de eventos ocurridos, en morado las probabilidades absolutas y en verde las probabilidades de excedencia de caída de tefra según el modelo de Arias (2020).

De los resultados del árbol probabilístico, en el caso de que una erupción del volcán Villarrica con IEV=2-3 esté en curso, la probabilidad condicional de que ocurran lahares es 63% (n= 24), flujos de lava 37% (n=14), proyectiles balísticos 84% (n=32), flujos piroclásticos 5% (n=2) y caída de tefra 97% (n=37).

En cuanto al sector en que orientan los lahares, existe una probabilidad del 100% (n=24) de que se oriente hacia el sector Pucón, dado que el lahar está ya en curso, un 58% (n= 14) hacia el sector Coñaripe.

Para cada sector la probabilidad de que un lahar cause un impacto en la zona de impacto proximal es de un 100% (n=24 y n=14, sector Pucón y Coñaripe respectivamente), dado que el lahar ya está en curso en dicho sector. La probabilidad para la zona de impacto medio son 71% (n=17) y 57% (n=8), sector Pucón y sector Coñaripe respectivamente, y para la zona de impacto distal un 21% (n=5) y 29% (n=4) (sector Pucón y sector Coñaripe respectivamente). Como es de esperar, las probabilidades se hacen menores a medida que la distancia es mayor al cráter del volcán. Como se ha mencionado anteriormente, las probabilidades son determinadas considerando el impacto efectivo de los lahares, es decir, que muchos lahares que alcanzan el lago y no se han reportado daños o inundaciones laterales, solo representan eventos de la zona de impacto proximal.

La probabilidad de que un flujo de lava se oriente tanto hacia el sector Pucón, como el sector Coñaripe, son 79% (n= 11, para ambos sectores), dado que el flujo de lava está ya en curso.

Para cada sector la probabilidad de que el flujo de lava cause un impacto en la zona de impacto proximal es 100% (n=11, para ambos sectores), y en la zona de impacto medio es 27% (n=3, para ambos sectores), dado que la orientación del flujo de lava ya está en curso en dicho sector. Solo en el sector Coñaripe el flujo de lava tiene un 18% (n=2) de probabilidades que alcance la zona de impacto distal. Se estima que la zona de impacto distal para el sector Pucón es alcanzado por flujos de lava solo en erupciones con características como las ocurridas 3.700 años AP, es decir, se estima una probabilidad absoluta del 0.32%.

Tanto para lahares, como flujos de lava, la orientación hacia el sector Palguín y el alcance de sus impactos son asociados a las erupciones ocurridas prehistóricamente, es decir, las ocurridas 3.700 años AP (0,32%) para todas las zonas de impacto, excepto la zona de impacto distal de lavas que se asocian a eventos aún más antiguos: 13.900 años AP (0,09%).

El fenómeno de proyectiles balístico es más bien de naturaleza central, es decir, que la orientación no presenta un papel determinante, por lo que todos los sectores presentan un 100% (n=32) de probabilidad de ocurrencia dado que un proyectil balístico está en curso. Las probabilidades condicionales para las zonas de impacto proximales son 100% (n=32). Sin embargo, para que alcance una zona de impacto medio se asocia a antiguos eventos de gran magnitud, ocurridos 13.900 años AP (0,09%). Se establece que en la zona de impacto distal es imposible que sea afectado por proyectiles balísticos.

Los flujos piroclásticos, considerando la poca cantidad de eventos ocurridos, la probabilidad condicional de que se oriente hacia el sector Pucón es de 100% (n=2) y hacia el sector Coñaripe 50% (n=1) y tan solo alcanzan a afectar la zona de impacto proximal en un 100% (n=2 y n=1, para el sector Pucón y Coñaripe, respectivamente). Se asocian al alcance de la zona de impacto medio las erupciones ocurridas hace 3.700 años AP (0,32%) y a la zona de impacto distal las erupciones ocurridas hace 13.900 años AP (0,09%), para todos los sectores.

La probabilidad de que la caída de tefra se oriente hacia el sector de Pucón es de 11% (n=4), sector Coñaripe 14% (n=5) y sector Palguín 78% (n=29), dado que el fenómeno de caída de tefra está ya en curso. Las probabilidades de excedencia condicionales de alcance de los impactos de cada sector: Pucón, Coñaripe y Palguín (considerando la dirección de los vientos) son todos 100% en la zona de impacto proximal; 27, 14 y 79%, respectivamente, en la zona de impacto medio; y 6, 4 y 47%, respectivamente, en la zona de impacto distal.

4.5. Discusiones

Para la confección del árbol probabilístico del volcán Villarrica se requirió recolectar y seleccionar información, escoger una manera de estructurarlo y una manera de procesar los datos. Cada una de estas etapas está acompañada de circunstancias y decisiones que implican limitaciones e incertidumbres, algunas inherentes a toda estimación probabilística de fenómenos volcánicos. En este subcapítulo se discuten acerca de las limitaciones, incertidumbres e implicaciones asociada a los resultados y uso del árbol probabilístico, y sugerir otras metodologías útiles para la confección de árboles probabilístico en futuros trabajos. También, se discute acerca de una propuesta de árbol probabilístico de lahares considerando la temporada seca y húmeda como nodo. Finalmente, se discuten los resultados y se da respuesta al objetivo específico de este capítulo y su utilización.

4.5.1. Recolección y Selección de la Actividad Eruptiva

Respecto a la recolección y selección de información del volcán Villarrica se debe tener en cuenta las limitaciones existentes para las estimaciones probabilísticas de los eventos eruptivos como la escasez de datos de la actividad histórica eruptiva para estimar pronósticos robustos y confiables para cualquier volcán. Además, la ausencia de observaciones o monitoreos continuos en el pasado pueden generar sesgos en la determinación de pronósticos, por lo cual fue necesario definir ciertos criterios (descritos en los subcapítulos anteriores) para complementar los vacíos de información. En este trabajo, se han seleccionado 38 eventos $IEV=2-3$, la cual es una cantidad aceptable considerando que el volcán Villarrica posee uno de los registros más extensos y completos en Chile. Complementar la información de estos eventos con futuros hallazgos, tanto sedimentológicos como históricos, o la ocurrencia de nuevas erupciones, podría mejorar los pronósticos de futuros trabajos. Por lo tanto, el uso de este árbol probabilístico está limitado a los conocimientos que se han recolectado y establecidos actualmente. A pesar de esto, los resultados del árbol probabilístico muestran una tendencia distinguible y clara de las probabilidades del comportamiento de los fenómenos volcánicos dada la ocurrencia de una erupción que son útiles para la toma de decisiones.

4.5.2. Metodología de la Confeción del Árbol Probabilístico

Respecto a la metodología se debe tener en cuenta que las decisiones tomadas pueden variar el modo en que comunica la información de los eventos eruptivos y también en los pronósticos del árbol probabilístico.

La elección de los nodos es el factor determinante del modo en que se comunica la información que presenta el árbol probabilístico. Se ha elaborado una versión simplificada de éstos para que sea apropiada y útil para usuarios no especializados y para funcionarios a cargo de plan y gestión de emergencia, porque responde a cuestiones prácticas en caso de una erupción. Por lo tanto, su uso en investigación o monitoreo podría resultar incompleto y de menor interés.

Aunque se consideran los principales fenómenos volcánicos generados en una erupción en el volcán Villarrica, otros fenómenos que los secunda, como derrumbes, avalanchas y tsunamis no son consideradas por la carencia de registros relacionados con éstos. Sin embargo, futuros hallazgos acerca la orientación y alcance de estos eventos podría complementar este árbol probabilístico.

La definición y zonificación de los nodos de impacto, y qué fenómenos volcánicos caen dentro de una zona de impacto significativo es un criterio subjetivo. Parte de la discusión, es que otro investigador podría definir los límites de otro modo. Por ejemplo, que un fenómeno volcánico es considerado dentro de la zona de impacto medio tan solo al tocar los límites de la zona, o sobrepase solo un 10% la diferencia del radio, etc. Lo relevante, es que el usuario del árbol probabilístico interprete correctamente la definición de los límites del nodo para que los pronósticos sean entendidos también correctamente. En este trabajo, el usuario debe saber que el fenómeno volcánico debe sobrepasar al menos un 33% la diferencia de los radios para estar representado dentro del nodo correspondiente.

4.5.3. Procesamiento de los datos del Árbol Probabilístico

Respecto al procesamiento de los datos se debe tener en cuenta que las decisiones tomadas pueden variar también los pronósticos del árbol probabilístico:

Los pronósticos son calculados con base en el teorema de Bayes, sin embargo, Marzocchi *et al.* (2004) propone el uso de la distribución *Beta*, la cual permite tener en cuenta formalmente la incertidumbre asociada a la probabilidad. Esto podría mejorar significativamente la comunicación de los pronósticos del volcán Villarrica. Sin embargo, no se utiliza en este trabajo, puesto que es necesario definir subjetivamente la varianza de cada nodo, lo cual es una estimación que solo puede resultar aceptable si es realizado por un comité de expertos.

Con el fin de entregar una información más completa, no se utiliza únicamente el cálculo probabilístico con base en la inferencia bayesiana en el procesamiento de los datos, sino que también se estimaron pronósticos del nodo de impacto de caída de tefra usando el modelo de Arias (2020) y de las estimaciones derivadas de erupciones prehistóricas. Por lo tanto, es posible cuestionar que tan correlacionables o comparables son los pronósticos entre estas tres formas de determinación probabilística. Pese a esto, las tendencias generales, es decir, que la probabilidad de un nodo sea comparativamente mayor, igual o menor que otro, para cada pronóstico son plausibles, y permiten comunicar la información esencial a los usuarios objetivos para tomar decisiones con sus fines prácticos.

4.5.4. Pronóstico de Lahares en Temporada Seca o Húmeda

Se realiza un árbol probabilístico complementario únicamente de lahares, agregando un nodo de temporada entre el nodo de erupción y el nodo de fenómeno volcánico (Fig. 4.11-4.12). En las figuras no se muestran el nodo de erupción, por lo que se debe considerar que su probabilidad es del 100% y la cantidad de eventos es de 38.

En este caso se define el nodo *temporada* $P(2|1)$ como la probabilidad de que una erupción ocurra en una temporada determinada, dado que una erupción está en curso. Los nodos son temporada *húmeda* y *seca*. La temporada húmeda comprende desde mayo hasta septiembre, y la temporada seca desde octubre hasta abril, siendo la temporada húmeda la de mayores precipitaciones de lluvia y con un volumen mayor del glaciar del volcán, los cuales pueden afectar la naturaleza y alcance del impacto de los lahares (subcapítulo 2.2.4).

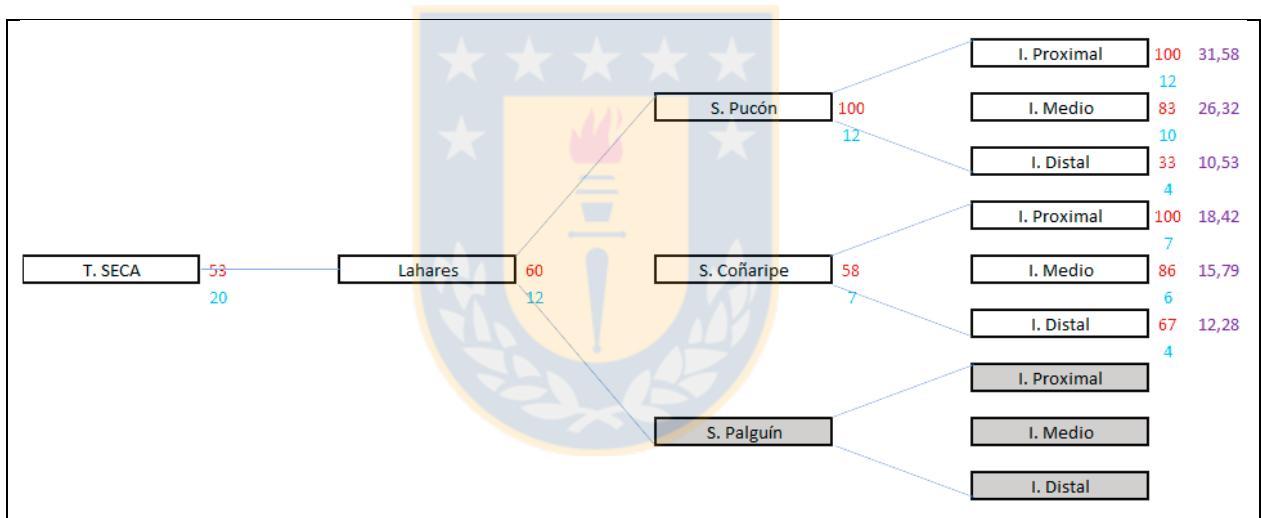


Figura 4.11: Árbol probabilístico de temporada seca para lahares del volcán Villarrica. En rojo la probabilidad condicional y en azul la cantidad de eventos ocurridos. En gris los nodos los cuales no fueron posible calcular la probabilidad condicional por inferencia bayesiana.

De este análisis se observan los siguientes puntos: (1) la cantidad de erupciones ocurridas durante la temporada húmeda es significativamente menor comparado con las ocurridas en la temporada seca. (2) La probabilidad de ocurrencia de lahares es levemente mayor en la temporada húmeda dado que la erupción está ya en curso en dicha temporada. (3) Los alcances de los impactos de lahares tanto en el sector Pucón, como en Coñaripe son significativamente mayores en la temporada seca. Las observaciones 2 y 3 son las contrarias a las esperadas, en este caso es debido a una insuficiencia en la calidad de los datos en base a la metodología utilizada en este trabajo. Esto es

porque la diferencia entre la cantidad de eventos conocidos ocurridos en temporada húmeda versus los conocidos en temporada seca impide una comparación confiable entre los resultados de uno u el otro. Además, entre los eventos de temporada seca se incluyen las dos erupciones de $IEV=3$ del registro histórico y, además, se sabe que coincidentemente llovió en la erupción de 1964 (en temporada seca) causando la destrucción de Coñaripe por el paso destructivo de un lahar; estas coincidencias favorecen la probabilidad de un mayor alcance de los lahares en la temporada seca.

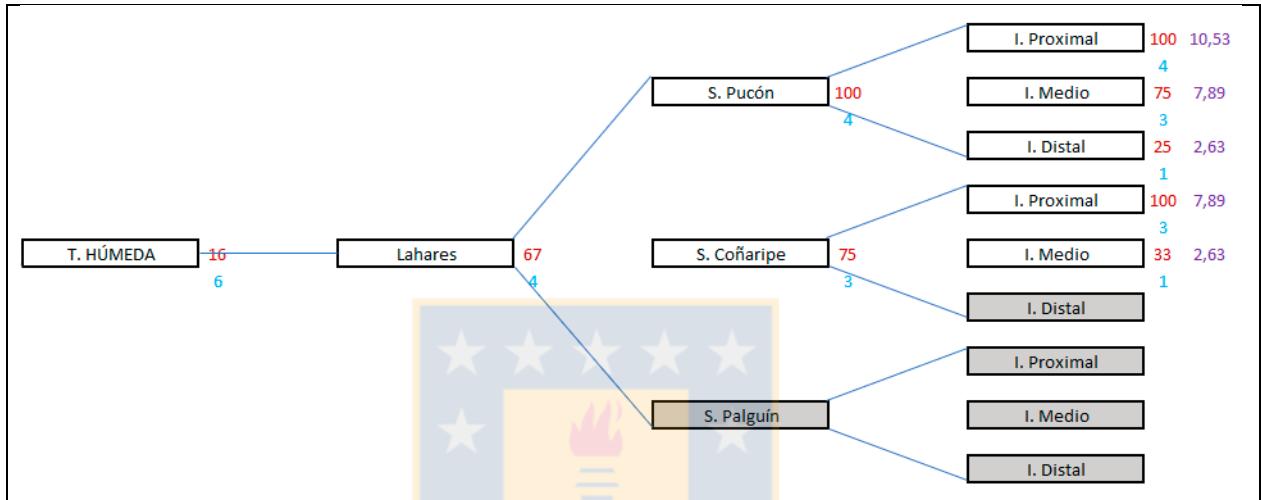


Figura 4.12: Árbol probabilístico de temporada húmeda para lahares del volcán Villarrica. En rojo la probabilidad condicional y en azul la cantidad de eventos ocurridos. En gris los nodos los cuales no fueron posible calcular la probabilidad condicional por inferencia bayesiana.

De este análisis se puede desprender que, ya que en el registro histórico conocido la frecuencia de erupciones ocurridas en temporada seca es significativamente mayor que en temporada húmeda, se debe tener en cuenta que las probabilidades de los nodos asociados al impacto de lahares para el árbol probabilístico del volcán Villarrica (Fig. 4.6) podrían ser subestimados. Es decir, si una erupción ocurre en temporada húmeda las probabilidades de ocurrencia en todas las ramificaciones del nodo de lahares podrían ser mayores.

4.5.5. Resultados y Utilización del Árbol Probabilístico

En este subcapítulo se discuten los resultados de este capítulo y su utilización como herramienta de gestión y planificación de emergencias.

El usuario del árbol debe primero evaluar cuales es las diferencias de probabilidades de cada fenómeno volcánico considerando también sus zonas de afectación, puesto que cada uno tiene una

naturaleza diferente y medidas de mitigación o prevención diferentes. Por ejemplo, a pesar de que la probabilidad de proyectiles balístico es bastante alta, solo está acotado en la zona de impacto proximal, donde su efecto solo debe ser gestionado como advertencia y preparación de evacuaciones realizadas a tiempo a personas que visitan el Parque Nacional Villarrica. En cambio, fenómenos como lahares, cuya probabilidad, aunque menor, todavía es alta (casi dos tercios de las erupciones); y, además, su impacto puede llegar a zonas distales, donde hay además una densidad alta de población permanente. Entonces, el funcionario a cargo debe gestionar en consideración que la evacuación en caso de lahares puede presentar mayor complejidad, así como también puede requerir de preparación de campañas de difusión y simulacros.

Como se ha mencionado anteriormente, también el usuario debe saber que las probabilidades que se informan en el árbol probabilístico representan aquellos fenómenos volcánicos que sobrepasan un tercio de la diferencia de los radios. Si el usuario quiere saber las probabilidades que sea impactado el centro de esquí o el parque cuevas volcánicas, los cuales se encuentran entre los límites de la zona de impacto proximal y la extensión de los 33% (es decir entre los 5.225 m y 7.194 m de radio de distancia al centro) debe interpretar la información considerando el siguiente criterio: si se informa que un fenómeno volcánico impacta la zona de impacto medio en el sector Pucón, es totalmente posible que el centro de esquí y las cuevas volcánicas fuesen afectados; sin embargo, si se informa que un fenómeno volcánico impacto la zona de impacto proximal en el sector Pucón, es tanto posible como no que el centro de esquí y las cuevas volcánicas fuesen afectados.

Respecto al pronóstico de lahares, la probabilidad de que se oriente un lahar hacia el sector Coñaripe es menor que Pucón, pero la probabilidad que alcance el sector de impacto distal es levemente mayor en el sector Coñaripe. La diferencia de que un lahar se oriente hacia un sector u otro es debido a los escarpes de las calderas, pero su alcance también tiene como factor las características topográficas durante su recorrido. Los usuarios pueden considerar, por ejemplo, que la probabilidad que los lahares impacten el balneario de Coñaripe es algo mayor que impacte la ciudad de Pucón o la ruta 199, dado que un lahar esté ya en curso hacia dicho sector. Sin embargo, si se quiere saber el impacto sobre, por ejemplo, la entrada del Parque Nacional Villarrica en comparación con las Termas Vergara o Geométricas, la probabilidad de que lahares impacten sobre la entrada del parque es considerablemente mayor. Las probabilidades de que el sector Palguín

sean afectados por lahares son casi despreciables. Sin embargo, aunque pueda ser considerado una prioridad menor, no se recomienda descuidarlo.

Respecto al pronóstico de flujos de lava, tanto el sector Pucón como Coñaripe tienen la probabilidad (un tercio de las erupciones) de ser afectados en su zona de impacto proximal y media, únicamente el sector Coñaripe tiene probabilidad de que un flujo de lava alcance su zona de impacto distal. Esto es debido, principalmente, a la abertura de fisuras hacia el S del volcán. Aunque no se debe descartar que la apertura de una fisura hacia el N pueda generar lavas que puedan avanzar hasta la zona de impacto distal del sector Pucón. Los flujos de la lava, en general, son relativamente los menos peligrosos, aunque existen medidas de mitigación y prevención que deben ser respetados. Las probabilidades de que el sector Palguín sean afectados por flujos de lava también son casi despreciables.

Respecto al pronóstico de proyectiles balísticos, la zona de impacto proximal presenta un 100% de probabilidades condicionales para éste y también los demás fenómenos volcánicos (excepto en algunos casos puntuales del sector Palguín). Esta información implica que esta zona debería ser de exclusión, puesto que es seguro que será impactada por algún fenómeno volcánico durante una erupción.

Respecto al pronóstico de flujos piroclásticos muestran que es posible que afecten la zona de impacto proximal en sector Pucón y Coñaripe con muy bajas probabilidades. Aunque estas probabilidades podrían ser subestimadas considerando el informe realizado por Vera (2018), puesto que él determina que las avalanchas mixtas comienzan con un flujo de escoria (un tipo de corriente de densidad piroclástica) y al parecer son comunes en la actividad del Villarrica.

Respecto al pronóstico de caída de tefra, éstos son determinados por el registro de sedimento de los lagos y puede ser contrastada con la estadística de la dirección de los vientos (Fig. 4.13), la cual muestra que las probabilidades de que la caída de tefra sea orientada hacia el sector Pucón y Coñaripe son prácticamente insignificantes en comparación a que sea orientada hacia el sector Palguín. Esta diferencia en la orientación de la caída de tefra puede deberse a que: (1) el registro histórico representa un instante aleatorio de todo el campo de viento ocupado en el modelo. (2) Dicho registro también presenta un grado de incertidumbre en su interpretación. (3) La dirección de los vientos no es el único factor que determina la dispersión de la tefra.

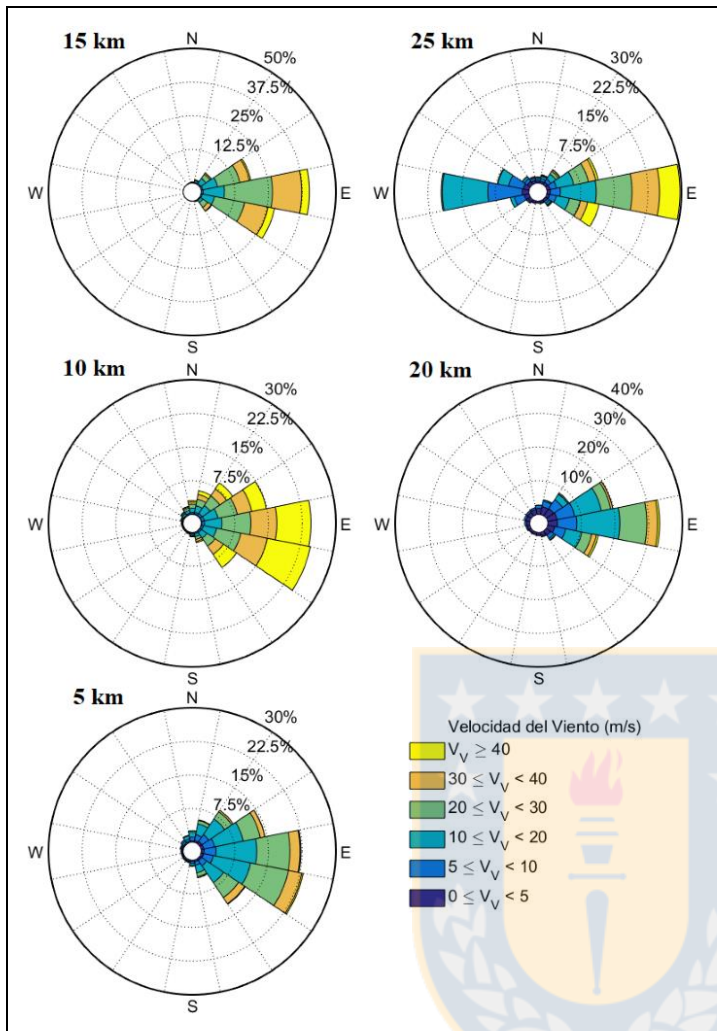


Figura 4.13: Diagramas de rosa con estadística de vientos para alturas de 5, 10, 15, 20 y 25 km para volcán Villarrica. Las direcciones indican donde el viento se dirige y las velocidades se expresan en m/s (cuadro inferior en colores). Obtenido de Arias, 2020.

4.6. Conclusiones

Considerando el objetivo específico de este capítulo, la determinación de las probabilidades y zonas de afectación a través de la confección y uso de un árbol probabilístico del volcán Villarrica, para su utilización en gestión y planificación de emergencias; se concluye, en términos generales, que, el árbol probabilístico es una herramienta potente en la comunicación de muchos escenarios posibles y sus probabilidades.

Los nodos fueron definidos pensando en las necesidades prácticas de los usuarios de gestión y planificación de emergencia, se espera que la efectividad de su uso sea el apropiado. Sin embargo, futuros trabajos podrían buscar probar empíricamente su comunicación y efectividad en usuarios no especializados a través de estudios con enfoque *top-down* o *bottom-up*.

Las probabilidades absolutas se determinaron utilizando: (1) el cálculo probabilístico con base a la inferencia bayesiana. (2) El cálculo entre las áreas de las isopletas de probabilidad de excedencia de caída de tefra (Arias, 2020) y las zonas de impacto. (3) La estimación derivada de erupciones prehistóricas. A pesar de que se utilizaron diferentes maneras de calcular la probabilidad absoluta, esto no impide que puedan ser agregadas dentro de la estructura del formato del árbol, y consultadas en el mismo gráfico.

Finalmente, la información estructurada y simplificada permite que su consulta directa sea cómoda y la definición de zonas de afectación permite su integración con otra información georreferenciada o productos. Por ejemplo, con la ubicación de lugares importantes como sitios de interés turísticos o de servicios. La integración del árbol probabilístico y su utilización con otros productos generados en esta Memoria de título pueden consultarse en el capítulo 7.



5. AMENAZA DEL VOLCÁN VILLARRICA

5.1. Estructuración

Para garantizar una correcta consistencia entre los resultados del análisis y el problema planteado se utiliza la estructuración formulada por Jorquera (2018), la cual pretende facilitar la revisión y utilización de la metodología y los resultados del análisis para los expertos y tomadores de decisiones al consultar este material. La estructuración propuesta consiste en la definición de diez aspectos de análisis los cuales son revisados a continuación.

5.1.1. Definición del Problema

Debido a la necesidad de realizar una adecuada planificación y gestión ante una potencial emergencia de erupción volcánica se requiere conocer, tanto el peligro volcánico, como los elementos vulnerables en los sectores aledaños al volcán. Además de la accesibilidad a las zonas de seguridad, y cómo se relacionan los elementos vulnerables con los peligros, es decir la amenaza volcánica.

En primer lugar, en este trabajo se propone un análisis de exposición que distribuye y cuantifica la población permanente y flotante en infraestructuras y sitios críticos, la cual busca resolver la necesidad de conocer la distribución de los elementos vulnerables expuestos en los sectores aledaño al volcán. Esto utilizando la información censal más actualizada hasta el momento.

Luego se propone una evaluación de amenaza a partir del análisis de exposición y los modelos de peligrosidad elaborados por Jorquera (2018), Álvarez (2020) y Arias (2020), los cuales fueron confeccionados especialmente para presentar claridad y comprensibilidad de los parámetros y métodos utilizados de modo de facilitar su uso y su posterior integración a análisis de amenaza o riesgo.

Además, el análisis de amenaza es realizado utilizando una resolución detallada, lo cual permite conocer el estado de amenaza de manera más local a diferencias de otros análisis de amenazas o riesgo disponibles (Lara *et al.*, 2006; Pérez, 2012). Esto permite, revisar la situación de amenaza actual en que se encuentran, por ejemplo, edificios habitados, establecimientos de alojamiento turísticos, servicios de salud, etc.

5.1.2. Objetivos y Utilización

Por un lado, el objetivo del análisis de exposición es cuantificar la distribución poblacional, tanto permanente, como flotante, en la infraestructura y sitios críticos en sectores aledaños al volcán Villarrica. Por el otro, el objetivo de los análisis de amenaza es cuantificar la distribución de la amenaza, considerando en ésta la integración de múltiples escenarios de fenómenos volcánicos. De este modo obtener valores referenciales y comparativos para su utilización.

Considerando lo anterior, la utilización de este material está orientado, principalmente, a la planificación y gestión de emergencias. Por lo tanto, puede ser usado por personal de las municipalidades, de la ONEMI y del COE. También, por expertos volcanólogos o en riesgos naturales para sus propios fines de investigación. Además, aunque no sea el usuario objetivo, incidentalmente puede ser utilizado también para la comunidad. Más detalles pueden ser consultados en el subcapítulo 5.1.10.

5.1.3. Peligros que Considerar

Los peligros considerados para la evaluación son las corrientes de densidad piroclásticas, flujos de lava, lahares, proyectiles balísticos y caída de tefra, cuyas definiciones y características pueden ser revisadas en el subcapítulo 2.2.

5.1.4. Escenarios Eruptivos y Escala de Tiempo

En este análisis se consideran eventos tanto prehistóricos, como históricos del volcán Villarrica (capítulo 3 y subcapítulo 4.2). Se utilizan los escenarios definidos en los modelos de Jorquera (2018), Álvarez (2020) y Arias (2020) con algunas modificaciones específicas, cuyos detalles pueden ser consultados en el subcapítulo 5.2.1.

Por lo tanto, se consideran escenarios de erupciones IEV=2, 3 y 4. En una escala de tiempo amplia, desde la ocurrencia de Ignimbritas Licán (13,9 ka años AP) y Pucón (3,7 ka años AP), pasando por las erupciones descritas en los siglos XVI al XX, hasta la última erupción (03 de marzo de 2015) ocurrida en el presente siglo.

5.1.5. Escala y Resolución Espacial

De la zonificación de los peligros volcánicos y de exposición se determina una escala de 1:300.000, para mapas globales, y de 1:75.000, para mapas locales. La primera escala permite mostrar todo el área de interés ocupado para los análisis de exposición y amenaza de este trabajo, el cual es definido en el subcapítulo 5.3.1. La segunda, permite mostrar con detalle los análisis de exposición y amenaza, de tal manera que permite una mejor visualización de la infraestructura y sitios de interés turístico y de servicio.

Respecto a la resolución espacial, aquellos fenómenos que dependen de la topografía son evaluados con un modelo de elevación digital de 12,5 m de resolución. Los elementos vulnerables son localizados en el mapa con puntos geográficos establecidos sobre un mapa satelital del *Google Earth* con resolución de 25 x 30 cm. Finalmente, la resolución del análisis de exposición es de 100 m, lo cual representa aproximadamente el tamaño de una manzana. Por lo tanto, la resolución de la amenaza resultante también presenta una resolución de 100 m.

5.1.6. Elementos Vulnerables

El análisis de exposición considera la población permanente y flotante distribuida en la infraestructura y sitios críticos geolocalizados, como: edificios habitados, establecimientos de alojamiento turístico, infraestructura de servicios y sitios de interés turístico, así como rutas. Además, se añaden la ubicación de las vías de evacuación y puntos de encuentro de los planes de emergencias volcánica de Pucón, Villarrica, Panguipulli y el Parque Nacional Villarrica sector Rucapillán, en cada uno de los mapas de detalle. Los planes revisados en este trabajo son especificados en el subcapítulo 5.3.1.5. Los detalles de la especificación de todos los elementos vulnerables son descritos en el subcapítulo 5.3.1.

5.1.7. Metodología

Para cuantificar la amenaza volcánica se utilizan una cuantificación integrada del grado de peligrosidad distribuido espacialmente. Esto se obtiene de modelos previos elaborados por Jorquera (2018), Álvarez (2020) y Arias (2020), en función de puntajes de recurrencia conocida, alcance zonal y potencial de impacto directo, lo cual permite comparar diferentes escenarios de

fenómenos naturales peligrosos y sus zonas de alcance en términos de su valor de peligro total (subcapítulo 5.2). Por otro lado, se utiliza una cuantificación integrada del grado de exposición, el cual consiste en la distribución espacial de la población permanente y flotante en la infraestructura y sitios críticos, su cuantificación y condensación en una malla de 100 x 100 m. Estos valores de exposición cuantificados y geolocalizados se suman entre sí para obtener un grado de exposición para cada cuadro de la malla (subcapítulo 5.3). Finalmente, se intersecan ambos análisis y se multiplican los grados de peligrosidad integrado con el de exposición máxima y mínima para obtener un valor cuantificado de amenaza (subcapítulo 5.4).

5.1.8. Formato de los Resultados

Los resultados del análisis de amenaza son representados mediante:

- 1) Mapas de exposición poblacional máxima y mínima representado en una malla de 100 x 100 m (subcapítulo 5.3.3; Anexo 3), los cuales permite visualizar con detalle la exposición de las entidades importantes.
- 2) Mapa de amenaza representado en una malla de 100 x 100 m (subcapítulo 5.4; Anexo 5), los cuales permite visualizar la amenaza distribuida geográficamente y con el suficiente detalle para analizar rutas y puntos críticos.
- 3) Mapa de amenaza por entidades censales (subcapítulo 5.4), los cuales permite visualizar la amenaza promedio distribuida geográficamente en zonas definidas en el censo 2017.
- 4) Tabla de amenaza integrada (Tabla 1 *in* Anexo 4), el cual permite visualizar la información ordenada alfabéticamente y permite consultar directamente los valores de amenaza máxima y mínima obtenidos en el análisis.
- 5) Gráficos (subcapítulo 5.3.3 y subcapítulo 5.4), los cuales permite visualizar el porcentaje acumulado del grado de exposición y la amenaza promedio de las entidades importantes.

5.1.9. Limitaciones e Incertidumbres

Tanto el análisis de peligro, como de exposición poseen sus limitaciones propias, asociadas a la complejidad intrínseca de los fenómenos volcánicos y al comportamiento y crecimiento de la

población; y a las limitaciones en el conocimiento, como la escasez de los datos del registro volcánico y censales. Esto afecta en la predicción de escenarios futuros y, por lo tanto, en el uso de sus resultados para la planificación y gestión de emergencias.

En cuanto al análisis de peligro, además de las incertidumbres y limitaciones propias de la metodología (como sensibilidad a la resolución topográfica u otros parámetros, como de las consideraciones para las definiciones de sus escenarios, etc.), para todos aquellos fenómenos volcánicos que dependen fuertemente de la topografía, la evaluación de peligro cambia si la topografía circundante al volcán también cambia. Estos cambios de topografía pueden suceder por deslizamientos en las laderas y cambios de esorrentía. También, cambios climáticos a largo plazo pueden desencadenar cambios tanto en el volumen del glaciar y, por lo tanto, en la generación y alcance de lahares.

Por otro lado, en cuanto al análisis de exposición, se debe considerar que éste representa un escenario determinado de la situación poblacional y de infraestructura crítica, la cual puede cambiar considerablemente a través de los años, como, por ejemplo, aumento de la población y del turismo, o construcciones de nuevas viviendas en el sector.

En el subcapítulo 5.5 se discute más detalladamente las limitaciones e incertidumbres de la metodología y propuestas de cómo mejorar el análisis de amenaza del volcán Villarrica.

5.1.10. Indicaciones y Ejemplos para la Utilización de Resultados

De acuerdo con los objetivos y utilización del presente análisis de exposición y amenaza, los usuarios pueden utilizar sus resultados bajo las siguientes indicaciones:

- 1) El usuario que conforma parte del personal de planificación de emergencias, como personal de las municipalidades y la ONEMI, pueden revisar sus planes de emergencias al observar si las vías de evacuación y puntos de encuentro presentan o no amenaza y en qué grado. Esto puede entregar un antecedente para permitir una reevaluación del plan de emergencia como, por ejemplo, escoger nuevas vías de evacuación y nuevos puntos de encuentro, así como considerar la distribución de recursos económicos y humanos según el grado de amenaza en que se encuentra un sector u otro.
- 2) El usuario que conforma parte del personal de gestión de emergencias, como el COE, pueden utilizar este material para tomar decisiones en cuanto a qué sectores priorizar sus esfuerzos en caso

de una evacuación, o predecir y prevenir dificultades que podría haber en caso de una emergencia. Por ejemplo, identificando sectores con servicios críticos con alto grado de amenaza.

3) El usuario que es experto en volcanología o riesgos naturales puede revisar la metodología utilizada en este trabajo y usarla directamente para analizar la peligrosidad, exposición y amenaza de otros volcanes, o incluso, cualquier otro fenómeno natural potencialmente peligroso en un sector determinado.

5.2. Peligro del Volcán Villarrica

5.2.1. Definición de los Escenarios de Peligro Volcánico

Se establece una base de datos geolocalizada de peligros de corrientes de densidad piroclástica, lavas, lahares, proyectiles balísticos y caída de tefra del volcán Villarrica (Fig. 5.1-5.5), a partir de los modelos elaborados por Jorquera (2018), Álvarez (2020) y Arias (2020).

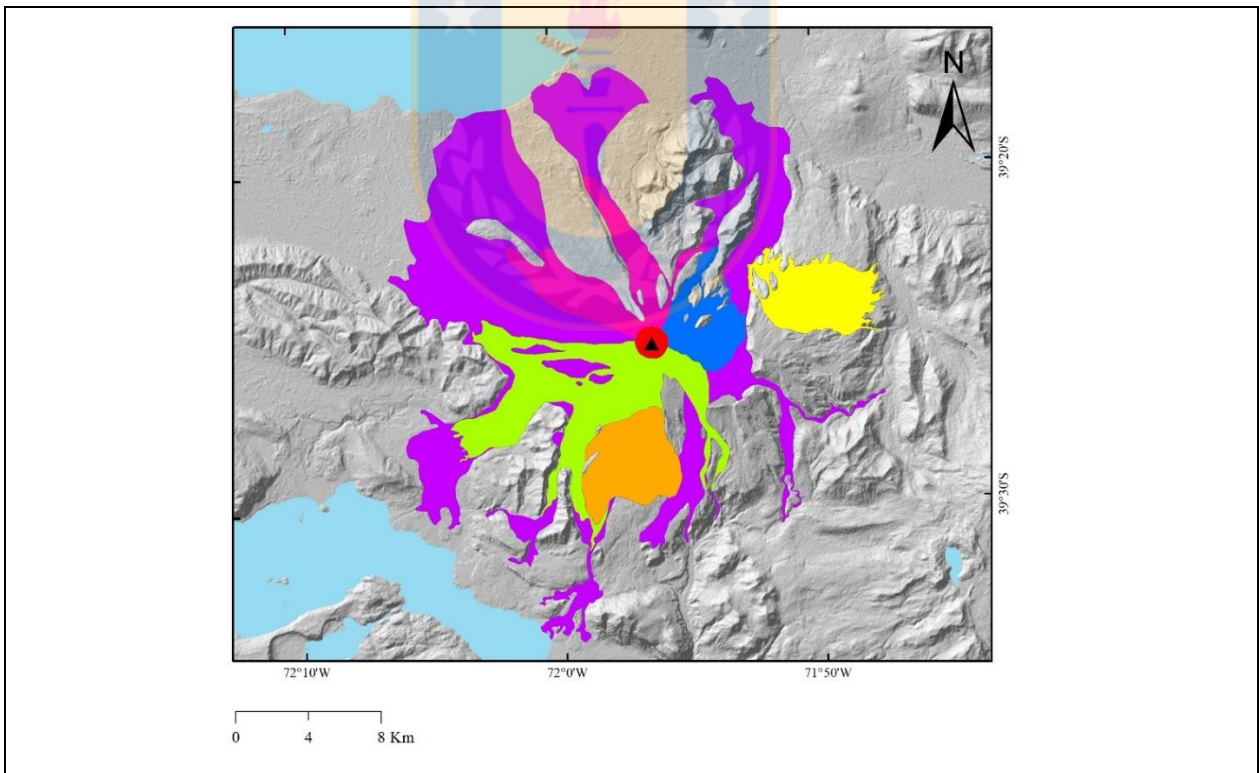


Figura 5.1: Zonas de flujos de lava del volcán Villarrica. Zona 1 (morado), zona 2 (rosado), zona 3 (azul), zona 4 (verde), zona 5 (amarillo), zona 6 (naranja) y zona 7 (rojo). Obtenido de Jorquera (2018).

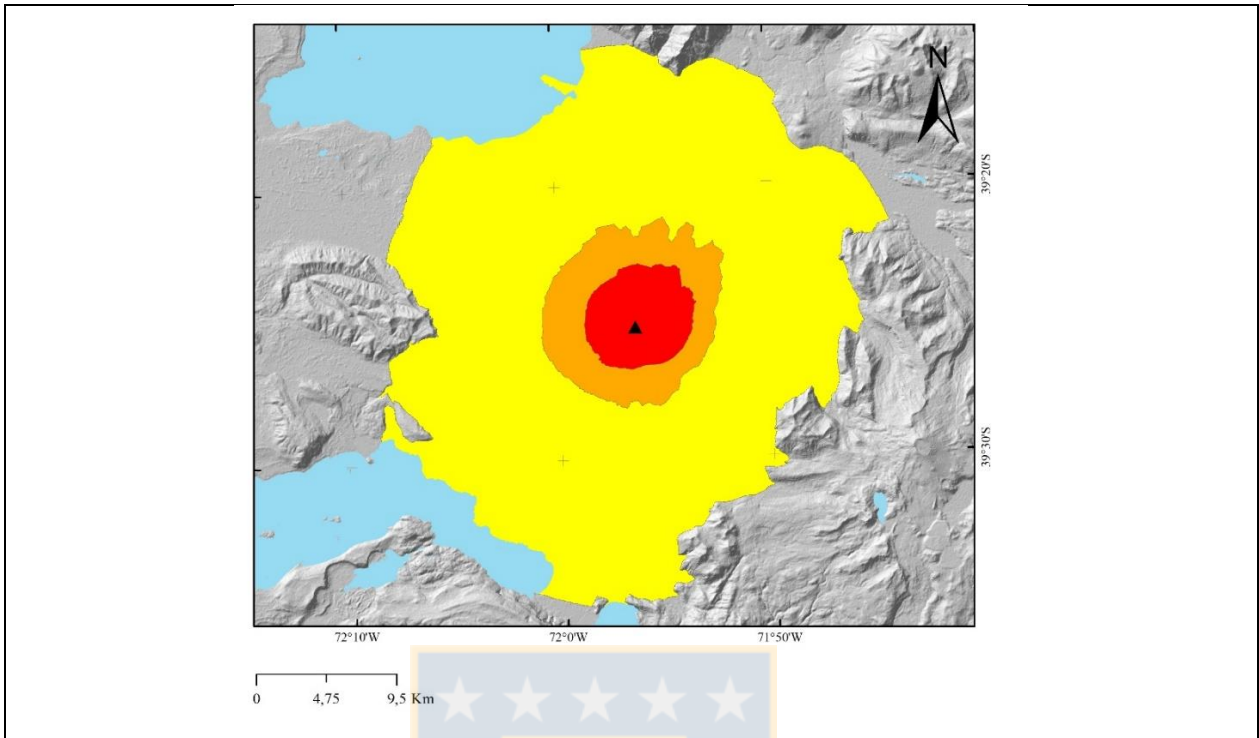


Figura 5.2: Distribución de zonas de corrientes de densidad piroclástica en el volcán Villarrica. Zona 1 (rojo), zona 2 (naranja) y zona 3 (amarillo). Obtenido de Jorquera (2018).

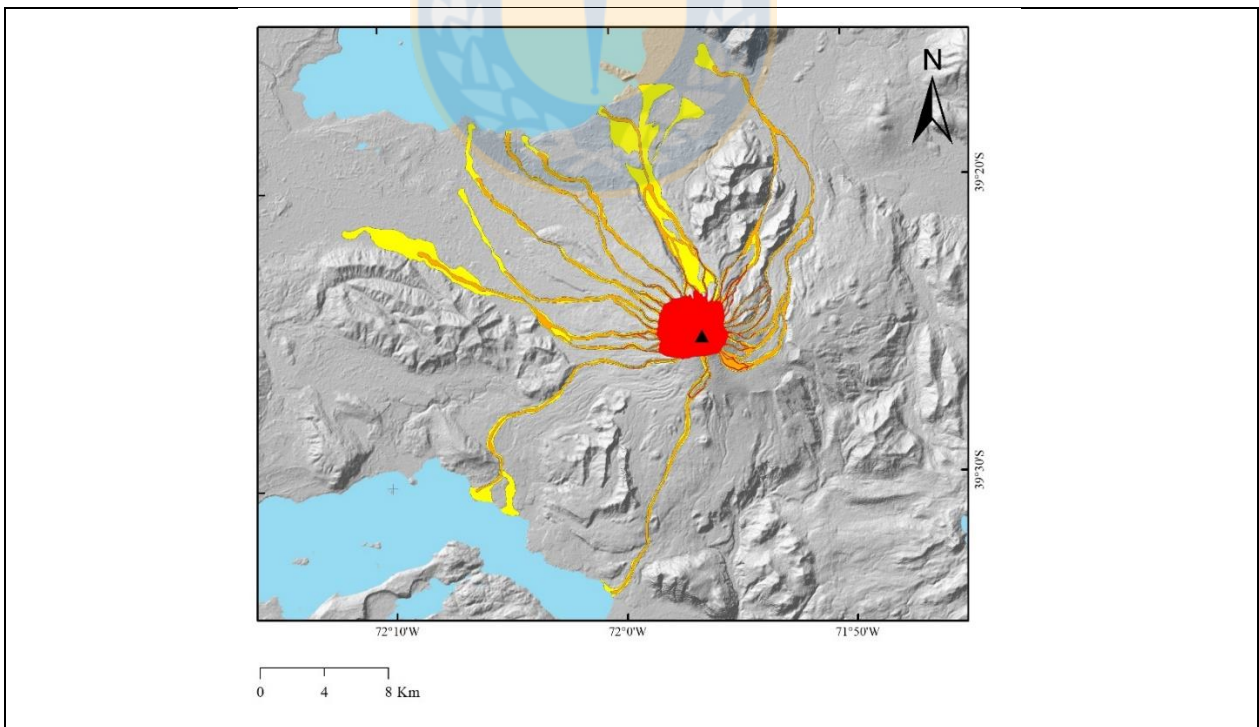


Figura 5.3: Zonación del peligro volcánico de lahares en el volcán Villarrica. Zona 1 (rojo), zona 2 (naranja) y zona 3 (amarillo). Modificado de Álvarez (2020).

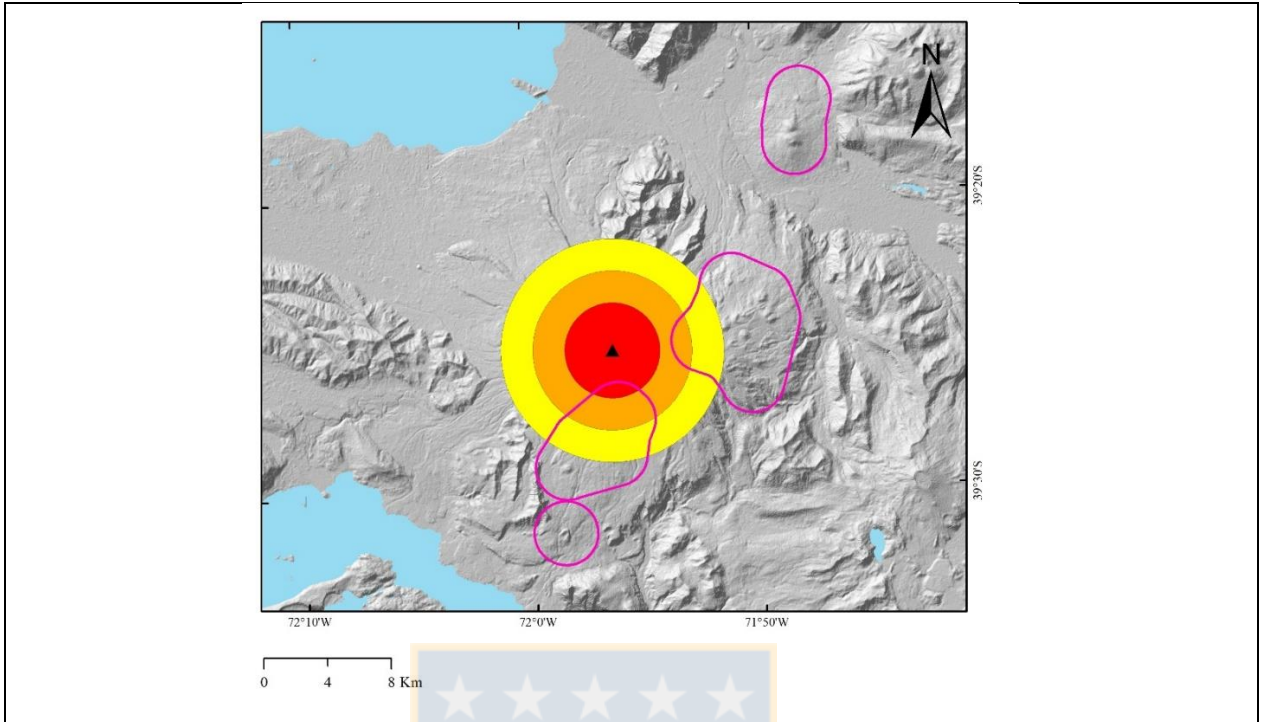


Figura 5.4: Mapa de peligro para caída de proyectiles balísticos del volcán Villarrica. Zona 1 (rojo), zona 2 (naranja), zona 3 (amarillo) y zona 4 (línea rosada). Modificado de Arias (2020).

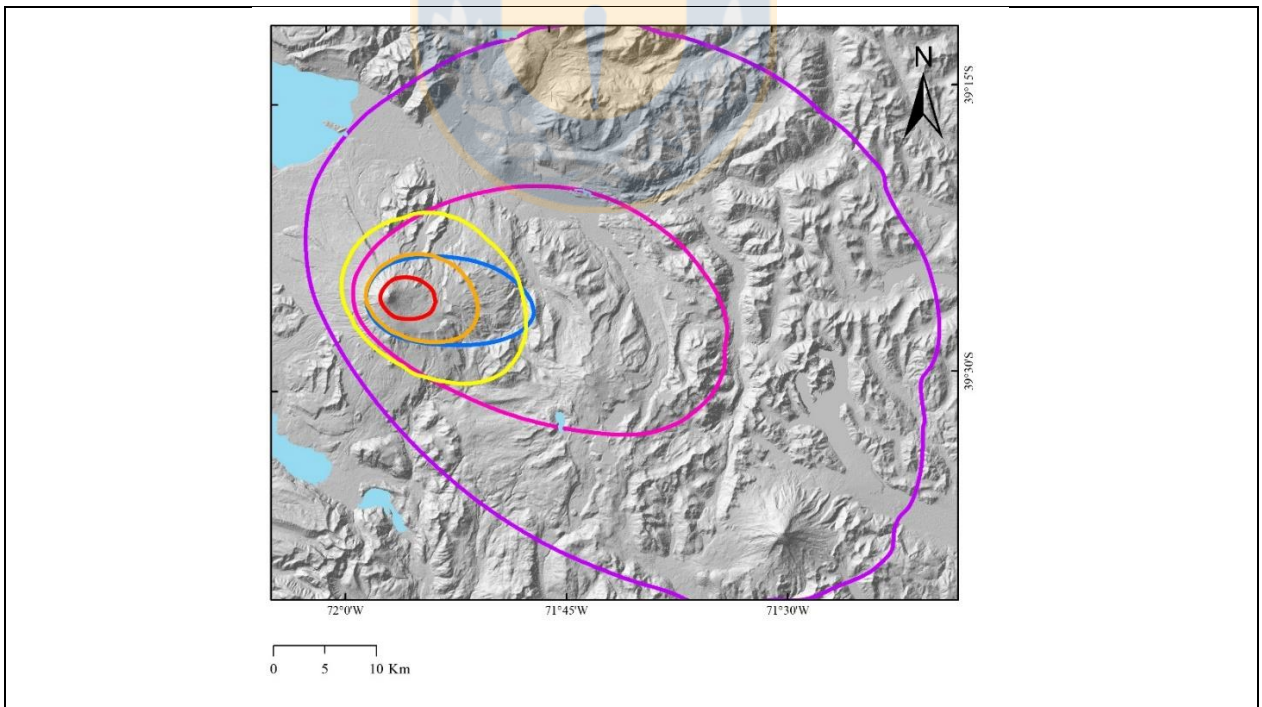


Figura 5.5: Mapa probabilístico de caída de tefra para el volcán Villarrica. IEV~2: zona 1 (rojo), zona 2 (naranja) y zona 3 (amarillo). IEV=3-4: zona 1 (azul), zona 2 (rosado) y zona 3 (morado). Obtenido de Arias (2020).

Para cada fenómeno volcánico los autores realizaron una revisión bibliográfica de la actividad del volcán Villarrica, siendo complementada con observaciones directamente obtenidas de terreno. De esta revisión se establecieron diversos escenarios eruptivos para cada fenómeno volcánico, los cuales representan las ocurridas tanto histórica, como prehistóricamente (Tabla 5.1).

Tabla 5.1: Escenarios de peligro del volcán Villarrica establecidos para el modelo de peligro. Obtenido de Jorquera (2018) para lavas y corrientes de densidad piroclástica, de Álvarez (2020) para lahares, y de Arias (2020) para proyectiles balísticos y caída de tefra.

Lava	<p>Zona 1: representa las áreas afectadas por una alta efusividad del volcán como lo fue en escenarios prehistóricos. Los flujos son emitidos desde el cráter principal y tienen una distribución radial. Por la topografía del cráter las lavas tienen una mayor probabilidad de inundar los flancos N y NE del edificio volcánico alcanzando distancias entre 14-18 km. Sin embargo, dado el antecedente de que se han producido fisuras en la abertura, no se descarta que los flujos puedan inundar los flancos S y SW afectando a la localidad de Coñaripe.</p>
	<p>Zona 2: representa a los flancos N y NW del volcán que, debido a factores morfológicos, presentan una mayor recurrencia de ser inundados frente a una erupción, es decir, que el curso natural de los flujos comienza por lo general en esa dirección. Considerando erupciones históricas donde los flujos emanados desde el cráter no han sido tan extensos, como lo fue en 1787 donde afectó al sector de Zajón Seco, 1948 y 1984 los flujos alcanzaron el sector de Correntoso, pudiendo afectar el sector actual del Refugio de montaña ubicado en el flanco N.</p>
	<p>Zona 3: al igual que la zona 2, se incluyen lavas de menor extensión emitidas desde el cráter principal, pero que implican inundación hacia el flanco E y NE del volcán. Los resultados de esta zona muestran que, frente a una erupción, los flujos no superan los 6,5 km de largo y que, en términos de frecuencia, es menor recurrente esta trayectoria que la zona 2. Erupciones históricas consideradas en la simulación fueron las de 1971 y 1984.</p>
	<p>Zona 4: es el área de inundación propuesta para el escenario dos, donde ocurre una fisura en dirección NE-SW y otra en dirección NS, ambas comenzando un poco más abajo del cráter principal. Esto para simular el carácter fisural del volcán Villarrica como lo observado en la erupción de 1971 donde los flujos tuvieron una extensión entre 6 a 16,5 km de largo en dirección WSW bajando por el estero de Chaillupén. Otras erupciones tomadas en consideración para la simulación fueron las ocurridas en 1964 y 1921, donde los flujos emanaron en sentido SSW. Para el caso de 1921 las lavas quedaron muy próximas de la localidad de Coñaripe. Para delimitar esta zona se consideró un promedio de los flujos.</p>
	<p>Zona 5: representa el escenario de inundación por los flujos lávicos del grupo Volcanes Los Nevados. Este grupo de conos se ubican en el flanco ENE del edificio volcánico. Históricamente las lavas emitidas son de poco alcance, no superando los 5 km de extensión.</p>

Tabla 5.1 (continuación): Escenarios de peligro del volcán Villarrica establecidos para el modelo de peligros.

Lava	<p>Zona 6: al igual que la zona anterior, se remite a las coladas emitidas desde el grupo Volcanes Chaillupén, ubicados hacia el sector S del volcán. Al igual que los Volcanes Los Nevados, los flujos de lava no son de gran alcance (unos pocos kilómetros) por lo que no se encuentran localidades aledañas afectadas por estos flujos.</p>
	<p>Zona 7: esta zona se estableció para destacar que independiente del escenario eruptivo establecido, hay un área del volcán que siempre se ha visto más amenazada. Esta corresponde a la zona inundada por la última erupción del año 2015. En esa oportunidad se originaron lavas clastogénicas, las cuales no superaron los 500 m de extensión desde el cráter. Otra importancia de esta zona es destacar el comportamiento de baja efusividad que podría tener el volcán Villarrica en un futuro evento eruptivo.</p>
Corrientes de densidad piroclástica	<p>Zona 1: área que especifica el alcance de flujos piroclásticos pequeños con baja movilidad (0,47) con un ángulo de 25°. En este escenario propuesto se esperaría que la actividad sea de carácter estromboliano. La altura de colapso se consideró entre los 100-400 m sobre el cráter y un alcance máximos de los flujos de 6.253 m, es decir que abarcan todo el cono del edificio volcánico terminando muy cerca del Refugio de montaña.</p>
	<p>Zona 2: para esta zona se adoptaron parámetros observados en volcanes similares (Llaima y Etna) al Villarrica, es decir, a pesar de que en su historia el volcán ha tenido actividad excesivamente efusiva o explosiva (no un rango intermedio) no se descarta que pueda presentar flujos de mediana movilidad como lo han hecho sus pares. Se simuló una altura de colapso sobre el cráter entre 400 y 800 m, una movilidad de 0,33 lo que equivale a un ángulo de 18 grados con una extensión máxima de los flujos de 10 km.</p>
	<p>Zona 3: zona que especifica el posible alcance de CDP de alta movilidad y se asocian a enormes volúmenes de flujos piroclásticos de gran extensión (21 km) similares a los ocurridos en tiempos prehistóricos, pero no tan lejanos como la Ignimbrita Pucón de hace 3.700 años. Frente a este tipo de escenarios se espera un IEV ≥ 4 que afecte a localidades como Pucón (hacia el N), Coñaripe (hacia el SW), sectores como Zajón Seco, Correntoso y el Refugio ubicados al N del edificio volcánico y también alcanzando a los lagos Villarrica y Calafquén. La movilidad es de 0,14 con un ángulo de 8° y la altura de colapso de la columna es de 400 m sobre el cráter.</p>
Lahares	<p>Zona 1: áreas de máxima probabilidad de inundación por lahares desde erupciones de baja magnitud, con IEV ≥ 1 y volúmenes de lahares del orden de $1 \times 10^5 \text{ m}^3$ o mayor, además del área de inundación de los lahares generados en la erupción del 2015.</p>
	<p>Zona 2: áreas susceptibles a ser inundadas por lahares desde erupciones de mediana magnitud (IEV ≥ 2) y volúmenes de lahares del orden de $1 \times 10^7 \text{ m}^3$ o mayor.</p>
	<p>Zona 3 (modificado): zonas inundables por grandes lahares generados en erupciones de gran magnitud (IEV $\geq 2 - 3$) y volúmenes de lahares del orden de $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ o mayor, como la erupción de 1971 (Naranjo & Moreno, 2004; Castruccio <i>et al.</i>, 2010).</p>

Tabla 5.1 (continuación): Escenarios de peligro del volcán Villarrica establecidos para el modelo de peligros.

Proyectiles balísticos	Zona 1 (modificado): área con mayor probabilidad a ser afectada por impacto de proyectiles balísticos (10 cm hasta métricos en los primeros 2 km), determinada por escenarios estrombolianos violentos de IEV=2. Se demarca un radio de 3 km desde el cráter principal correspondiente a un alto peligro.
	Zona 2 (modificado): área probablemente afectada por impacto de proyectiles balísticos (decimétricos), determinada principalmente por erupciones estrombolianas vigorosas a vulcanianas de IEV ~3. Se demarca un radio de 5 km desde el cráter principal correspondiente a un peligro medio.
	Zona 3 (modificado): área con probabilidad de ser afectada por el impacto de proyectiles balísticos, que está determinada por erupciones de estilo subpliniano a pliniano (IEV ~4). Estos afectarían a los edificios volcánicos en un radio de 7 km con respecto a los cráteres principales.
	Zona 4: área próxima a cráteres secundarios, adventicios o asociados a fisuras, que puede ser afectada por el impacto de proyectiles balísticos. Determinada principalmente por erupciones con explosiones estrombolianas. Estos afectarían a los cráteres secundarios en un radio de 2 km.
Caída de tefra IEV~2	Zona 1 (>70%), Zona 2 (>30%), Zona 3 (>5%): erupción estromboliana de IEV ≤ 2 , similar al del 3 de marzo del 2015: una altura para la columna eruptiva de 12 km s.n. y volumen de tefra de $2 \times 10^7 \text{ m}^3$. 10 cm de espesor.
Caída de tefra IEV 3-4	Zona 1 (>70%), Zona 2 (>30%), Zona 3 (>5%): erupción vulcaniana a subpliniana (IEV ~3-4), de características similares a ciclos eruptivos recientes, una altura para la columna eruptiva de unos 25 km s.n.m. con un volumen de $0,6 \text{ km}^3$ para un depósito de escorias. 10 cm de espesor.

Jorquera (2018) utiliza la herramienta *Q-LavHa* (Mossoux *et al.*, 2016 *in* Jorquera, 2018) para modelar la zona de inundación de un flujo de lava a partir de un modelo de elevación digital, de las coordenadas de cráteres y fisuras, y de la extensión de las coladas y sus espesores máximo y mínimo. Por otra parte, utiliza un modelo de cono de energía (Malin & Sheridan, 1982 *in* Jorquera, 2018; Sheridan, 1994 *in* Jorquera, 2018) para modelar la inundación de corrientes de densidad piroclástica a partir de las alturas de colapso de la columna eruptiva, y de los alcances finales del flujo (asumiendo una trayectoria lineal).

Álvarez (2020) utiliza la herramienta *LaharZ* (Schilling, 1998 *in* Álvarez, 2020; Iverson *et al.*, 1998 *in* Álvarez, 2020) para modelar las zonas de inundación de flujos laháricos a partir de un modelo de elevación digital, de los volúmenes del lahar (calibrado con la selección de los cauces de descarga del flujo) y de la definición una zona de peligro proximal o puntos de inicio de la descarga. Para los propósitos de este trabajo, se modifica la zona 3 de lahares de Álvarez (2020)

incorporando las inundaciones de lahares de la erupción de 1971 (Naranjo & Moreno, 2004; Castruccio *et al.*, 2010).

Arias (2020) utiliza la herramienta *TephraProb* (Biass *et al.*, 2016 *in* Arias, 2020) para modelar probabilidades de peligro por acumulación de tefra a partir de una grilla o puntos de ubicación, de las alturas, direcciones y velocidades de los vientos de al menos una década (Fig. 4.7), de las distribuciones del tamaño de las partículas de los depósitos de tefra, de las máximas y mínimas alturas de la columna, masas, y de los tiempos de duración de las erupciones. Por otra parte, a partir de información bibliográfica y comparación con otros volcanes análogos determina los límites radiales alrededor de los cráteres y fisuras del volcán para modelar la zonificación de los proyectiles balísticos. Para los propósitos de este trabajo, se modifica el alcance de los proyectiles balísticos de todas las zonas definidas por Arias (2020), restando 1 km a todos los radios establecidos. Esto es debido a que se estiman que estos alcancen son sobrestimados y no representan la realidad del volcán Villarrica, además permite ser consistente con el alcance definido en el capítulo de árboles probabilísticos.

5.2.2. Integración de los Peligros Volcánicos

Para la integración de los peligros volcánicos Jorquera (2018), Álvarez (2020) y Arias (2020) utilizan una matriz la cual se construye con base en la asignación de puntajes asociados a diferentes categorías predefinidas: (1) la *recurrencia conocida* en los últimos 2.500 años, 500 años y en el Holoceno (valores del 0-4), que representan una ocurrencia no probable, poco probable, incierta, probable y cierta, respectivamente; y, además, evaluada según su nivel de ocurrencia en los últimos 500 años (valores del 0-2), es decir, no se ha reconocido, se ha reconocido y es frecuente, respectivamente. (2) El *alcance zonal* representado tanto por su velocidad expresada en tiempo de llegada a la parte distal (valores del 1-4), es decir, días, horas a días, minutos a horas, segundos a minutos, respectivamente; así como por su dificultad de protección (valores del 0-2), es decir, fácil de escapar, con condiciones y muy difícil, respectivamente. Finalmente, (3) el *potencial de impacto directo* en representado por el daño a la salud, por la interrupción a las vías de evacuación, y por el daño a infraestructura o servicios (valores del 1-3), que representan un daño o interrupción leve, severo y absoluto, respectivamente. Para obtener el valor del total de peligro se multiplican la suma

de la recurrencia conocida, por el promedio del alcance zonal y por el promedio del potencial de impacto directo (Tabla 5.2).

Tabla 5.2: Integración de peligros del volcán Villarrica. Las abreviaturas CDPs y PBs, significan corrientes de densidad piroclástica y proyectiles balísticos, respectivamente. Los escenarios de caída de tefra son mostradas respecto a la magnitud IEV=3-4 y IEV~2. Obtenido de Jorquera (2018), Álvarez (2020) y Arias (2020).

		Recurrencia conocida					Alcance zonal			Potencial de impacto directo				Total Peligro
		En últimos 500 años	En últimos 2.500 años	Holoceno	Ocurrencia (<500 años)	Total Recurrencia	Velocidad	Dificultad de protección	Total Alcance	Provoca daño a la salud	Interrumpe vía de evacuación	Daño a infraestructura o servicio	Total Impacto	
CDPs	Zona 1	4	4	4	1	13	4	2	3	3	3	3	3	117
	Zona 2	2	4	4	0	10	3	2	2,5	3	3	3	3	75
	Zona 3	0	4	4	0	8	3	2	2,5	3	3	3	3	60
Lavás	Zona 1	0	4	4	1	9	2	0	1	3	3	3	3	27
	Zona 2	4	4	4	2	14	3	0	1,5	3	3	3	3	63
	Zona 3	4	4	4	2	14	3	0	1,5	3	3	3	3	63
Lavás	Zona 4	4	4	4	1	13	3	0	1,5	3	3	3	3	58,5
	Zona 5	1	4	4	1	10	3	0	1,5	3	3	3	3	45
	Zona 6	1	3	4	1	9	3	0	1,5	3	3	3	3	40,5
	Zona 7	4	4	4	2	14	4	0	2	3	3	3	3	84
Lahares	Zona 1	4	4	4	2	14	3	1	2	3	3	2	2,7	74,7
	Zona 2	4	4	4	1	13	3	1	2	3	3	2	2,7	69,3
	Zona 3	3	4	4	1	12	3	1	2	3	3	2	2,7	64
PBs	Zona 1	4	4	4	1	13	4	2	3	3	2	2	2,3	91
	Zona 2	4	4	4	1	13	4	1	2,5	3	2	2	2,3	75,8
	Zona 3	0	2	3	0	5	4	1	2,5	3	2	2	2,3	29,2
	Zona 4	0	3	4	0	7	4	2	3	3	2	2	2,3	49
IEV~2	Zona 1	4	4	4	2	14	3	2	2,5	1	1	2	1,3	46,7
	Zona 2	4	4	4	1,4	13,4	3	2	2,5	1	1	2	1,3	44,6
	Zona 3	4	4	4	1	13	3	2	2,5	1	1	2	1,3	43,3
IEV=3-4	Zona 1	4	4	4	2	14	3	2	2,5	1	1	2	1,3	46,7
	Zona 2	2	3	4	1,4	10,4	3	2	2,5	1	1	2	1,3	34,6
	Zona 3	1	2	4	1	8	3	2	2,5	1	1	2	1,3	26,7

Finalmente, el mapa de peligros integrados para el volcán Villarrica se confecciona al intersecar cada uno de los escenarios de peligro volcánico establecidos anteriormente (Tabla 5.1; Tabla 5.2). Del traslape de los escenarios de peligro, al mayor valor del total de peligro dentro del traslape se le suman los otros valores multiplicados por un factor de 0,1, con el fin de no sesgar los grados de peligrosidad de las áreas traslapadas sobre las que no lo están. El mapa de peligro integrado (Fig. 5.6) tiene como resultado grados de peligrosidad entre los 26,67 y 205,07.

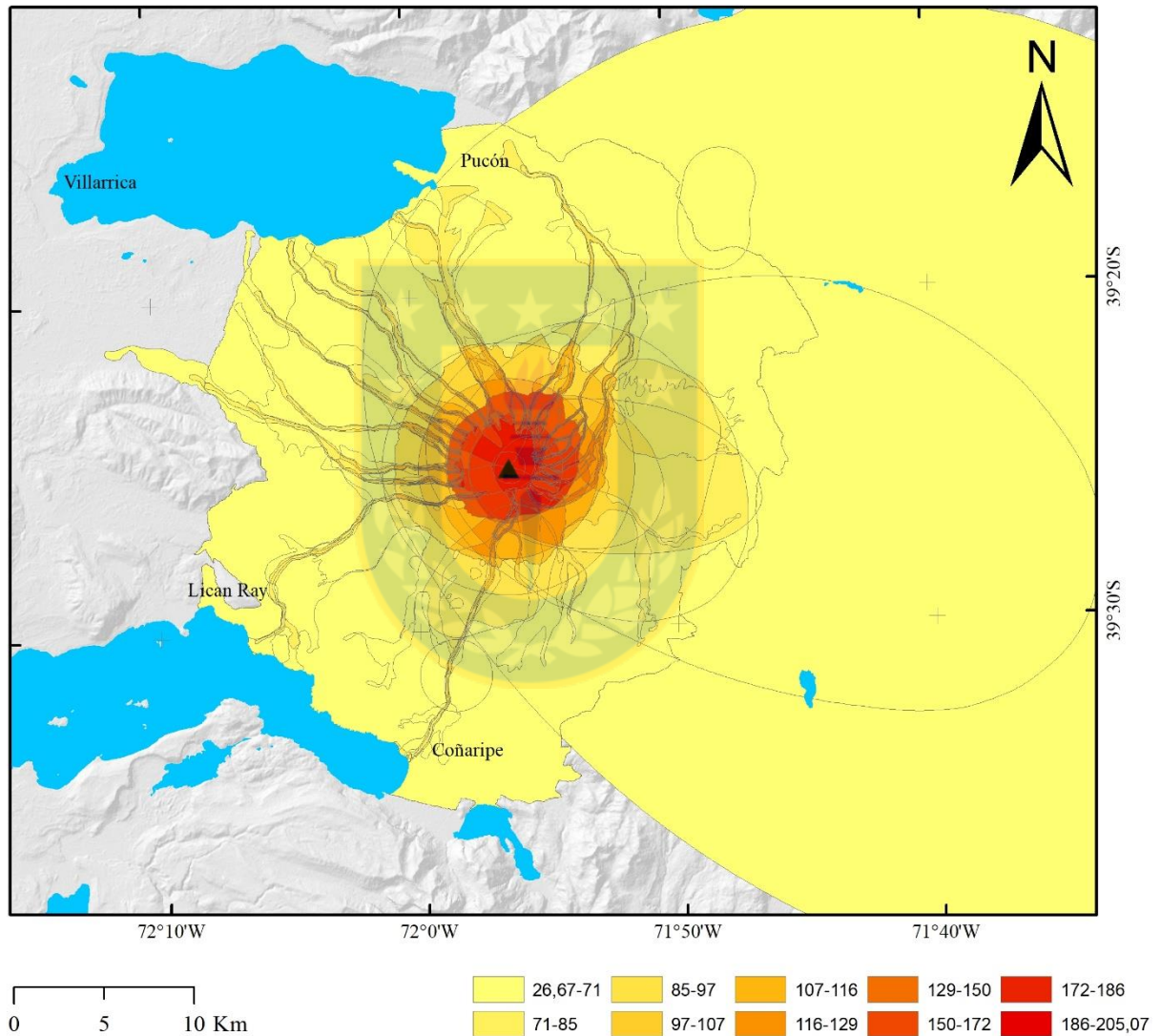


Figura 5.6: Mapa de peligros integrados del volcán Villarrica. Los valores de la leyenda representan el grado de peligrosidad en un área determinada obtenido de la suma de los totales de peligro de los escenarios traslapados cuyos valores que no son el mayor son multiplicados previamente por el factor 0,1. Modificado de Jorquera (2018), Álvarez (2020) y Arias (2020).

Los resultados del grado de peligrosidad muestran lo evidente: el peligro aumenta hacia la proximidad al cráter principal del volcán, por la ocurrencia de fenómenos volcánicos de alto impacto cercanos a éste; y, que el peligro aumente hacia la proximidad a las quebradas distribuidas radialmente en los flancos del volcán, debido al natural curso de los fenómenos volcánicos que tienden a pasar por las topografías bajas. Los grados de peligrosidad son comparables a cualquier otro análisis de peligro que sea definido bajo la misma metodología, tanto para otros volcanes, como para otros peligros naturales.

5.3. Exposición del Volcán Villarrica

5.3.1. Población e Infraestructura y Sitios Críticos Aledaños al Volcán

El análisis de exposición se realiza con base en la información geolocalizada disponible públicamente, tanto poblacional, como de infraestructura y sitios críticos, los cuales son recolectados de diversas fuentes de información estatal de las comunas, principalmente, de Pucón, Villarrica y Panguipulli; y en parte, Curarrehue.

5.3.1.1. Población Permanente

Según el censo 2017 (INE): Pucón tiene una población total permanente de 28.523 habitantes distribuidos en 17.356 viviendas; Villarrica tiene una población total permanente de 55.478 habitantes distribuidos en 28.288 viviendas; Curarrehue tiene una población total permanente de 7.489 habitantes distribuidos en 3.281 viviendas; y Panguipulli tiene una población total permanente de 34.539 habitantes distribuidos en 16.810 vivienda. De modo complementario a esta información se les añade a los gráficos la cantidad de habitantes y viviendas de los censos de 1992 y 2002 para tener una visión general de la evolución de estos parámetros en el tiempo (Fig. 5.7).

Los límites comunales no proporcionan el suficiente detalle para los propósitos de este trabajo, por lo que se utilizan las de manzanas (para zonas urbanas) y entidades (zonas rurales) también proporcionadas por el censo 2017, las cuales son zonas predefinidas institucionalmente para integrar la información de las encuestas del censo que fueron realizadas.

Para el análisis de exposición se escogen todas aquellas manzanas y entidades (Fig. 5.8) que caen completamente dentro de un área definida previamente, la cual permite que se consideren las manzanas y entidades necesarias para los análisis de exposición y amenaza. Esto da como resultando una cantidad de 1.163 entidades, sumando un total de 82.635 habitantes y 45.309 viviendas. En el mapa de manzanas y entidades censales 2017 (Fig. 5.8) se observa que algunas entidades sobrepasan el área mencionada anteriormente. Éstas son aquellas que intersecan con la zona de peligro delimitada en el mapa de peligro elaborado por el SERNAGEOMIN (Moreno, 2000). Los escenarios de los peligros mostrados en el mapa elaborado por SERNAGEOMIN son más extensos que los modelos utilizados en los análisis de peligro, con esto se pretende asegurar que se utilice un margen más amplio del área de la zona de exposición, de modo de contener completamente el área de la zona de peligro. Además, estas entidades que sobresalen son conservadas en su tamaño completo (sin cortar) para facilitar los cálculos del análisis, puesto que una entidad incompleta involucraría un procedimiento más complejo.

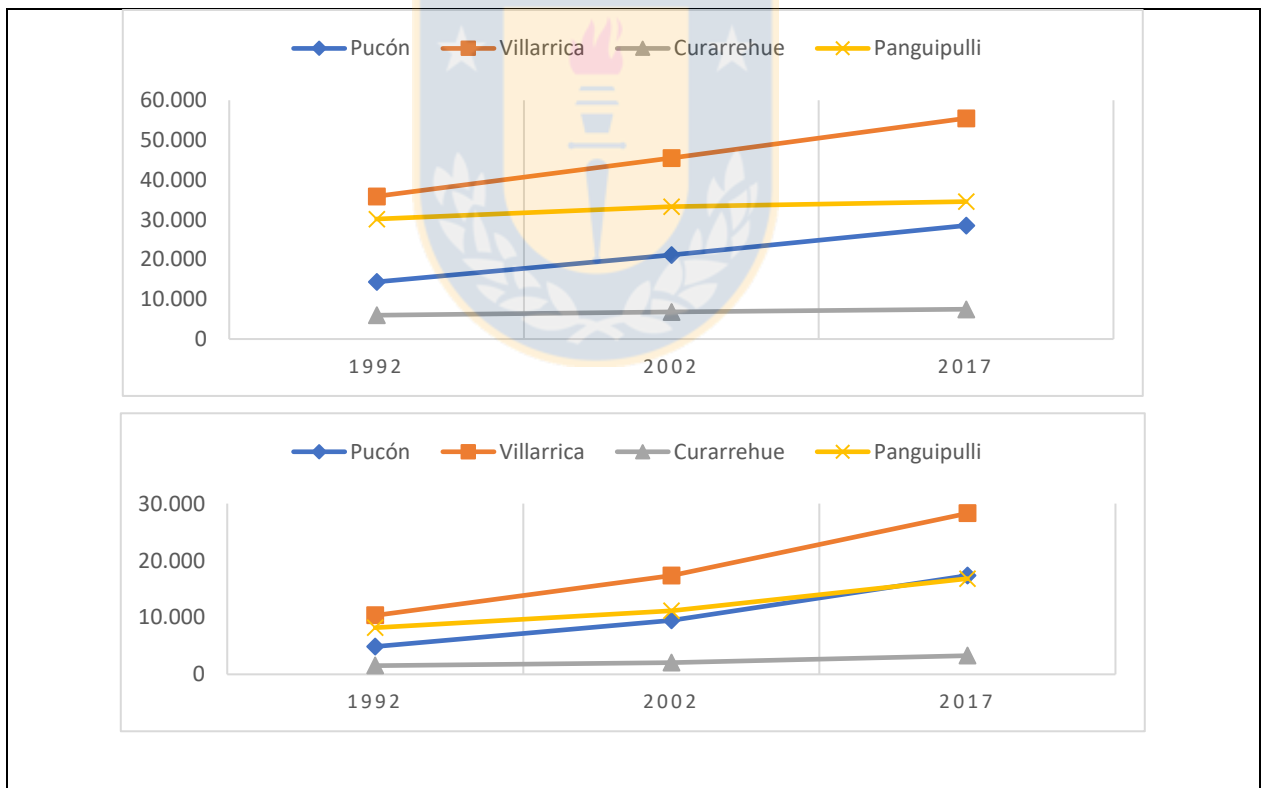


Figura 5.7: Gráfico de habitantes y viviendas de las comunas de Pucón, Villarrica, Curarrehue y Panguipulli. Arriba es representando la cantidad de habitantes del censo de 1992, 2002 y 2017. Abajo es representado la cantidad de viviendas de los mismos censos. Obtenido del INE.

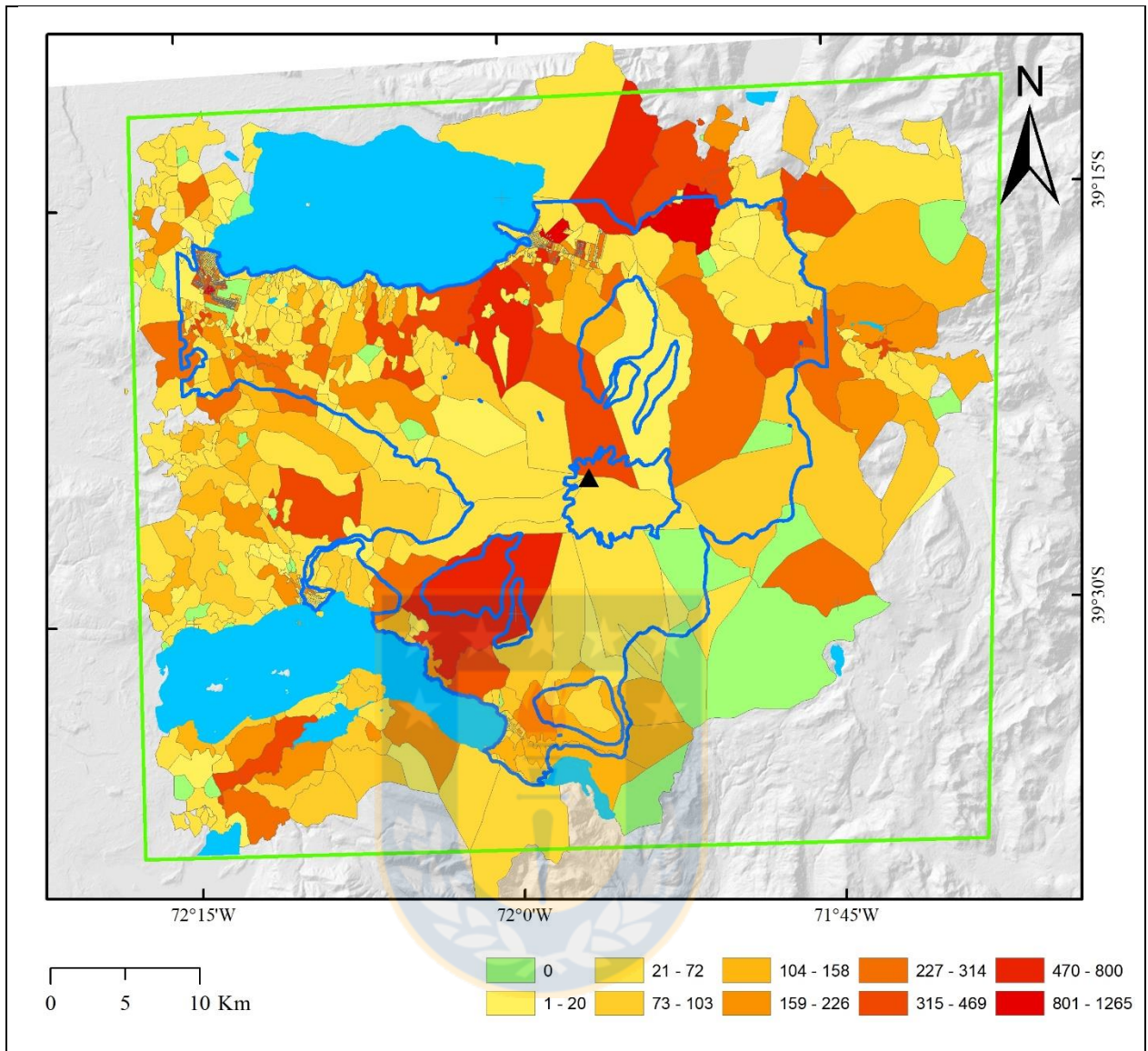


Figura 5.8: Mapa de manzanas y entidades censales 2017. La leyenda representa la cantidad de habitantes del censo 2017 elaborado por el INE. Área considerada para escoger las entidades a utilizar (línea verde). Límite del mapa de peligro del SERNAGEOMIN (línea azul) (Moreno, 2000).

Los habitantes de cada manzana y entidad censal son distribuidos equitativamente en cada uno de los edificios dentro del área de las manzanas o entidades censales respectivas. Los edificios son generados en una base de datos geolocalizada de infraestructura de edificios (Fig. 5.9) construida en *ArcGIS* 10.3 sobre la base de una imagen satelital de alta resolución obtenida de *Google Earth* (diciembre de 2017), donde se grafican punto por punto los edificios observados dentro de los límites de las manzanas y entidades censales utilizadas.

Se obtiene un total de 67.738 edificios graficados (49,5% adicionales a las viviendas censadas). Cada punto representa, por lo tanto, un valor de *habitantes por edificio*.

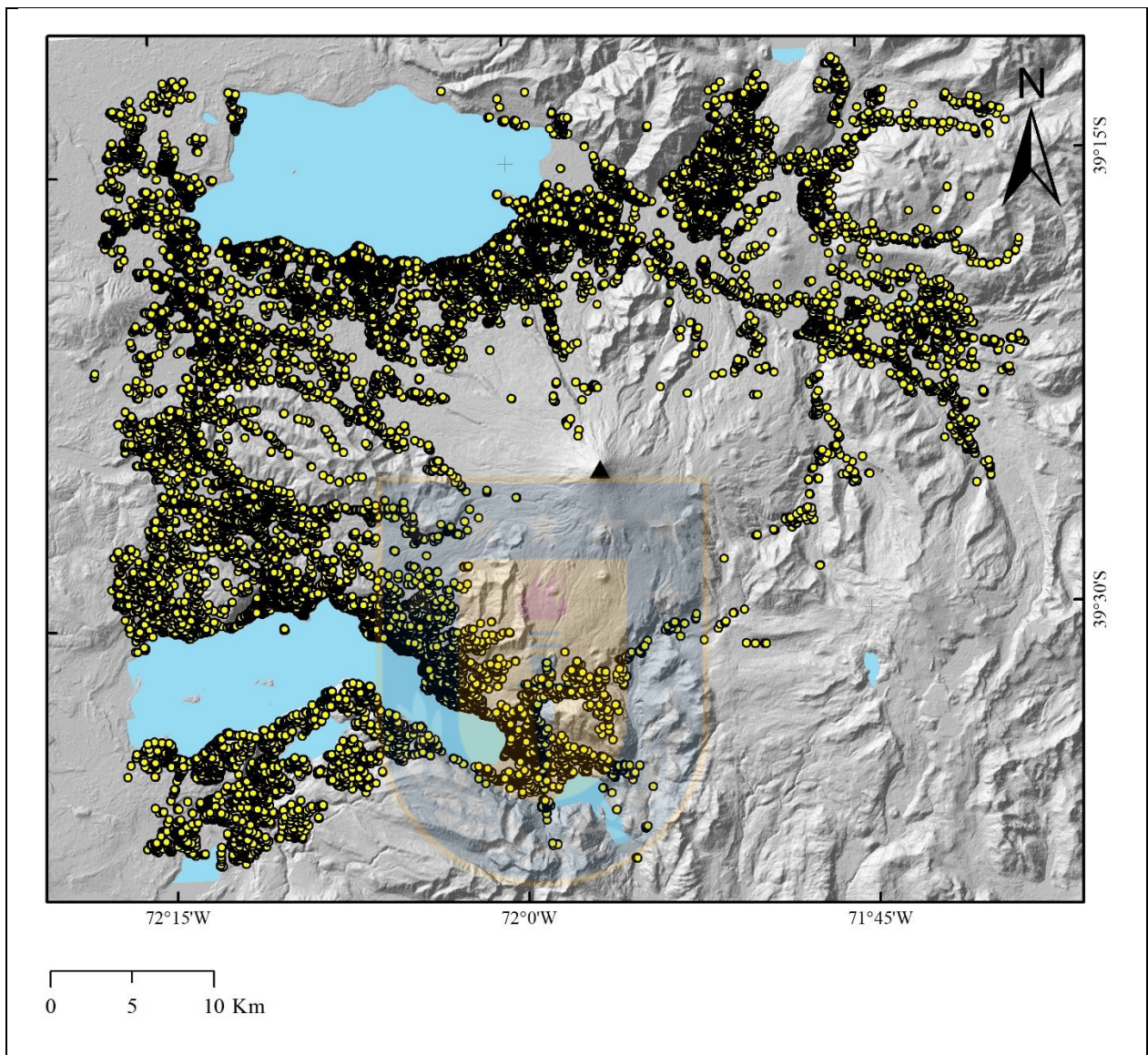


Figura 5.9: Mapa de infraestructura de edificios aledaños al volcán Villarrica. Cada punto amarillo representa un edificio. Elaboración propia.

5.3.1.2. Población Flotante

Según informes del INE, en 2018, Pucón ha recibido 220.155 llegadas de pasajeros a establecimientos de alojamiento turístico, Villarrica, 77.022 llegadas de pasajeros y Panguipulli, 54.238 llegadas de pasajeros. La gran cantidad de llegadas de turistas a sectores aledaños al volcán, incluso sumando casi tres veces la cantidad de habitantes en temporada alta en Pucón, hace

necesario incluir la variable de población flotante en el análisis de exposición, para ello, se realiza una revisión completa de la llegada de turistas mensualmente durante los últimos 10 años (Fig. 5.10; Tabla 1-3 *in* Anexo 2).

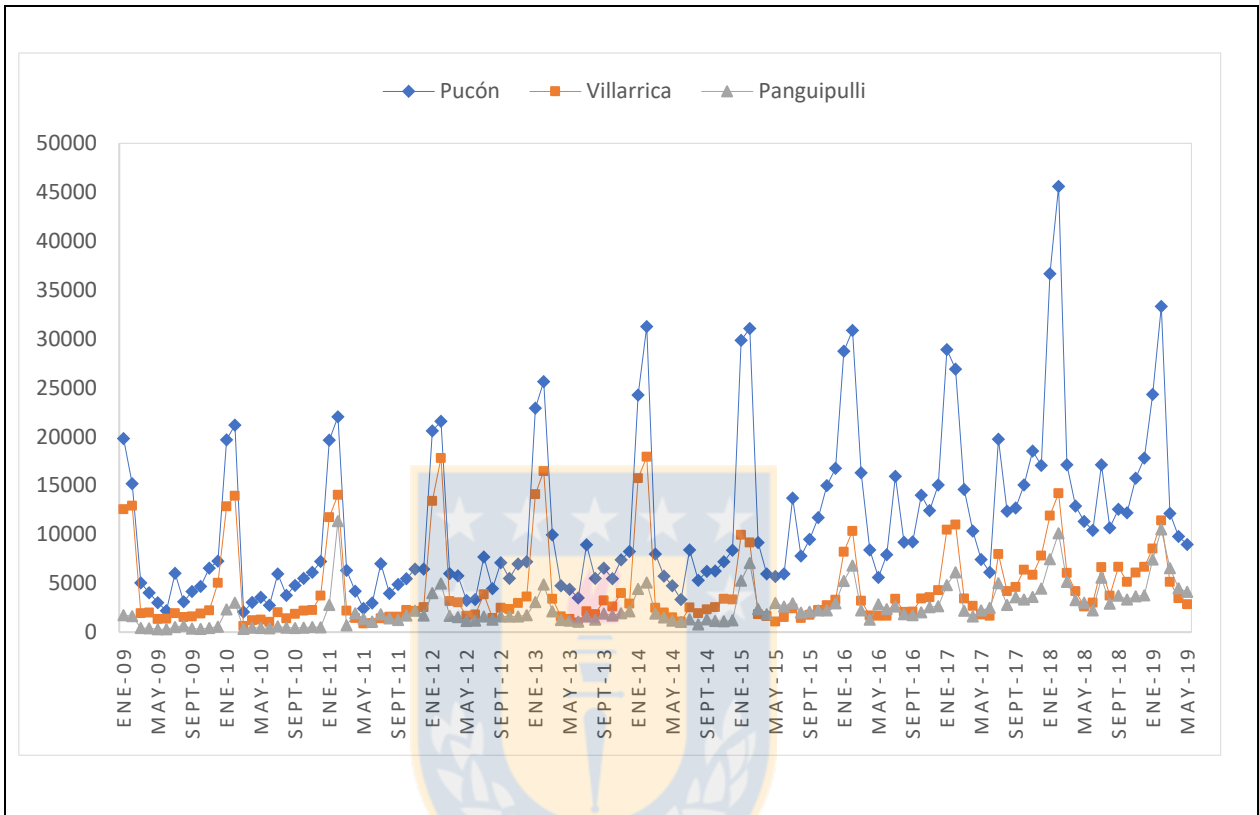


Figura 5.10: Gráfico de la llegada de turistas en las comunas de Pucón, Villarrica y Panguipulli.

Información recolectada desde enero de 2009 hasta mayo de 2019. Se debe considerar que la metodología entre 2009 a 2014, entre 2015 a junio de 2017 y entre julio 2017 al actual, son diferentes, y por lo tanto no son valores compatibles entre sí para análisis estadísticos. Obtenido de informes de llegadas y pernoctaciones del INE.

Del total de llegadas de turistas en las tres comunas (Tabla 5.3) se escoge el mes con mayor llegada y el segundo mes con menor llegada. No se escoge el mes de menor llegada, porque ocurre en marzo de 2010, posterior al terremoto 8,8 M_w ocurrido el 27 de febrero de 2010, con su epicentro a 150 km al NE de Concepción, el cual afectó toda la zona centro-sur de Chile y, por lo tanto, ese mes fue una situación excepcional y no coincide con la tendencia general de llegadas mensuales durante los últimos 10 años.

Tabla 5.3: Llegadas de turistas total de las comunas de Pucón, Villarrica y Panguipulli. En negrita se destaca el mes con mayor llegada de turistas y el segundo mes con menor llegada de turistas. Obtenido de información disponible en el INE.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2009	34.092	29.761	7.409	6.412	4.679	3.860	8.493	5.324	6.143	6.940	9.231	12.852
2010	34.880	38.143	3.027	4.718	5.284	4.192	8.575	5.635	7.086	8.188	8.928	11.444
2011	34.201	47.442	9.237	7.582	4.707	4.977	10.271	6.954	7.721	9.446	10.819	10.696
2012	38.006	44.378	10.856	10.334	6.075	6.338	13.169	7.168	11.201	9.483	11.579	12.579
2013	40.087	46.986	15.483	7.620	6.921	5.610	12.690	8.656	11.681	9.835	13.333	13.324
2014	44.435	54.262	12.381	9.233	7.431	5.476	12.253	8.000	9.872	9.958	11.745	12.926
2015	45.056	47.317	13.359	9.453	9.779	10.131	19.105	11.255	13.369	16.205	19.984	23.023
2016	42.233	48.055	21.761	11.438	10.146	11.971	21.979	13.095	13.068	19.481	18.537	21.994
2017	44.180	44.015	20.223	14.665	11.452	10.290	32.742	19.387	20.882	24.809	28.026	29.332
2018	56.029	69.915	28.349	20.383	16.986	15.669	29.331	17.319	23.001	20.698	25.477	28.259
2019	40.300	55.259	23.837	17.751	15.947							

Se obtienen valores máximos de población flotante por comuna representado por la cantidad de llegadas del mes de febrero de 2018 (con 45.585, 14.209 y 10.121 llegadas de pasajeros a Pucón, Villarrica y Panguipulli respectivamente). Se obtienen también valores mínimos de población flotante por comuna representado por la cantidad de llegadas del mes de junio de 2009 (1.366, 288 y 3.860 llegadas de pasajeros a Pucón, Villarrica y Panguipulli, respectivamente). Por la incompatibilidad entre los diseños metodológicos de cada Encuesta Mensual de Alojamiento Turístico (EMAT), del 2017, 2015 y el de 2004, se opta por no utilizar los promedios mensuales para el análisis de exposición.

Los escenarios de máxima y de mínima población flotante son distribuidos en cada uno de los establecimientos de alojamiento turísticos encontrados en una base de datos online del SERNATUR, los cuales son geolocalizados punto por punto (Fig. 5.11; Tabla 4 *in* Anexo 2), siendo un total de 175 establecimientos de alojamiento turístico en Pucón, 146, en Villarrica y, 142, en Panguipulli. En la base de datos cada punto, finalmente, representa la cantidad de *llegadas máxima y mínima por establecimiento de alojamiento turístico*.

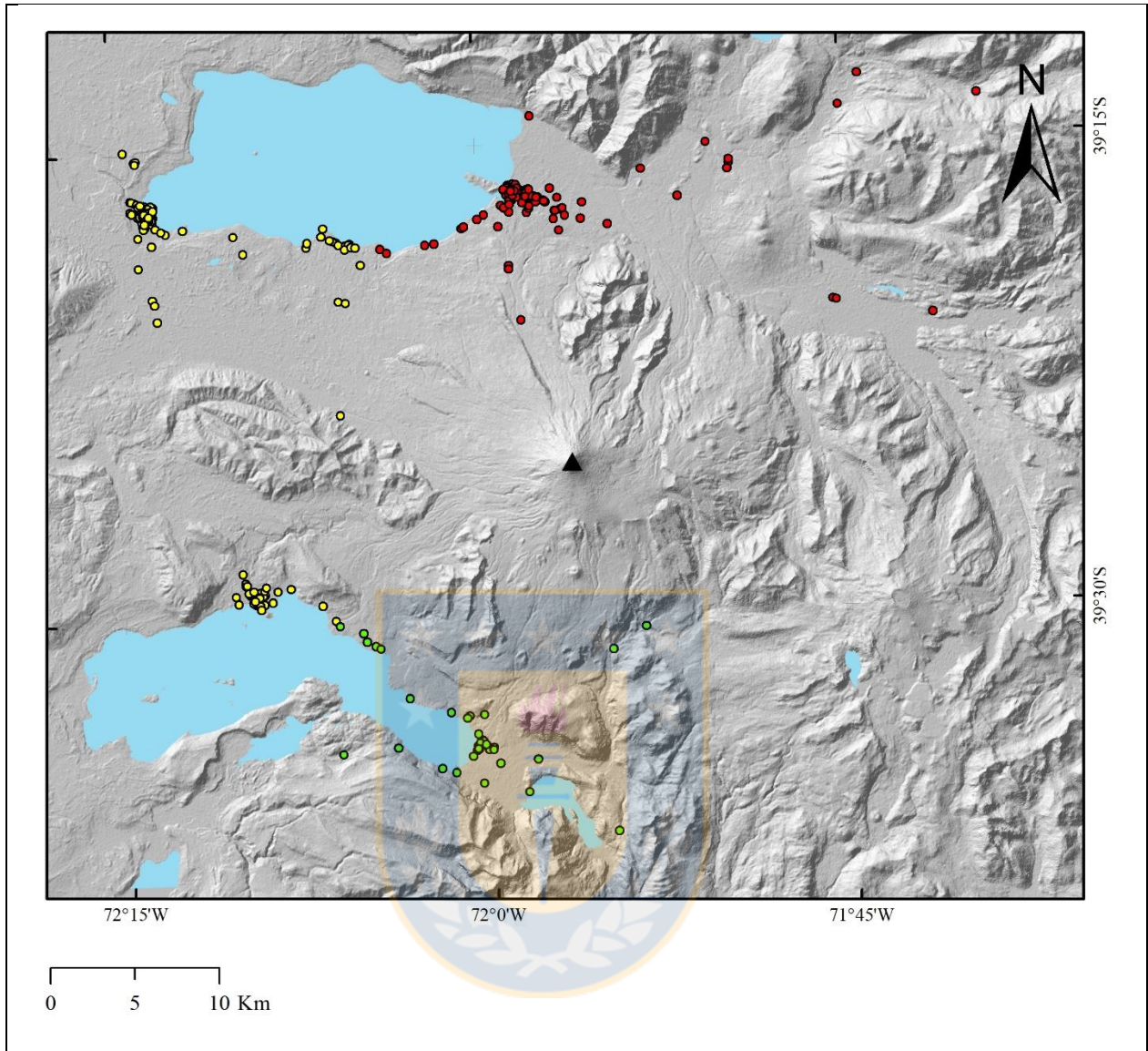


Figura 5.11: Mapa de distribución de los establecimientos de alojamiento turístico. En rojo los establecimientos de alojamiento turístico de Pucón. En amarillo, de Villarrica. En verde, de Panguipulli (se muestran solo los establecimientos dentro del área dentro de las entidades seleccionadas). Información obtenida del SERNATUR.

5.3.1.3. Infraestructura y Sitios Críticos de Servicio y Turismo

Se identifican y geolocalizan aquellas infraestructuras o sitios de interés que son críticos, es decir, aquellos puntos que poseen el potencial de concentrar una mayor cantidad de población. Estos son subdivididos en *infraestructura crítica de servicio* (Fig. 5.12; Tabla 5 in Anexo 2) y *de turismo* (Fig. 5.13; Tabla 6 in Anexo 2). Son identificados un total de 85 sitios con infraestructura de

servicio (CONAF, centros de salud, carabineros, etc.), cuyas ubicaciones son obtenidas de la Infraestructura de Datos Geospaciales (2017-2018) del Ministerio de Bienes Nacionales (MBN), siendo posteriormente modificada y complementada con sitios nuevos con base en una imagen satelital de *Google Earth* de alta resolución.

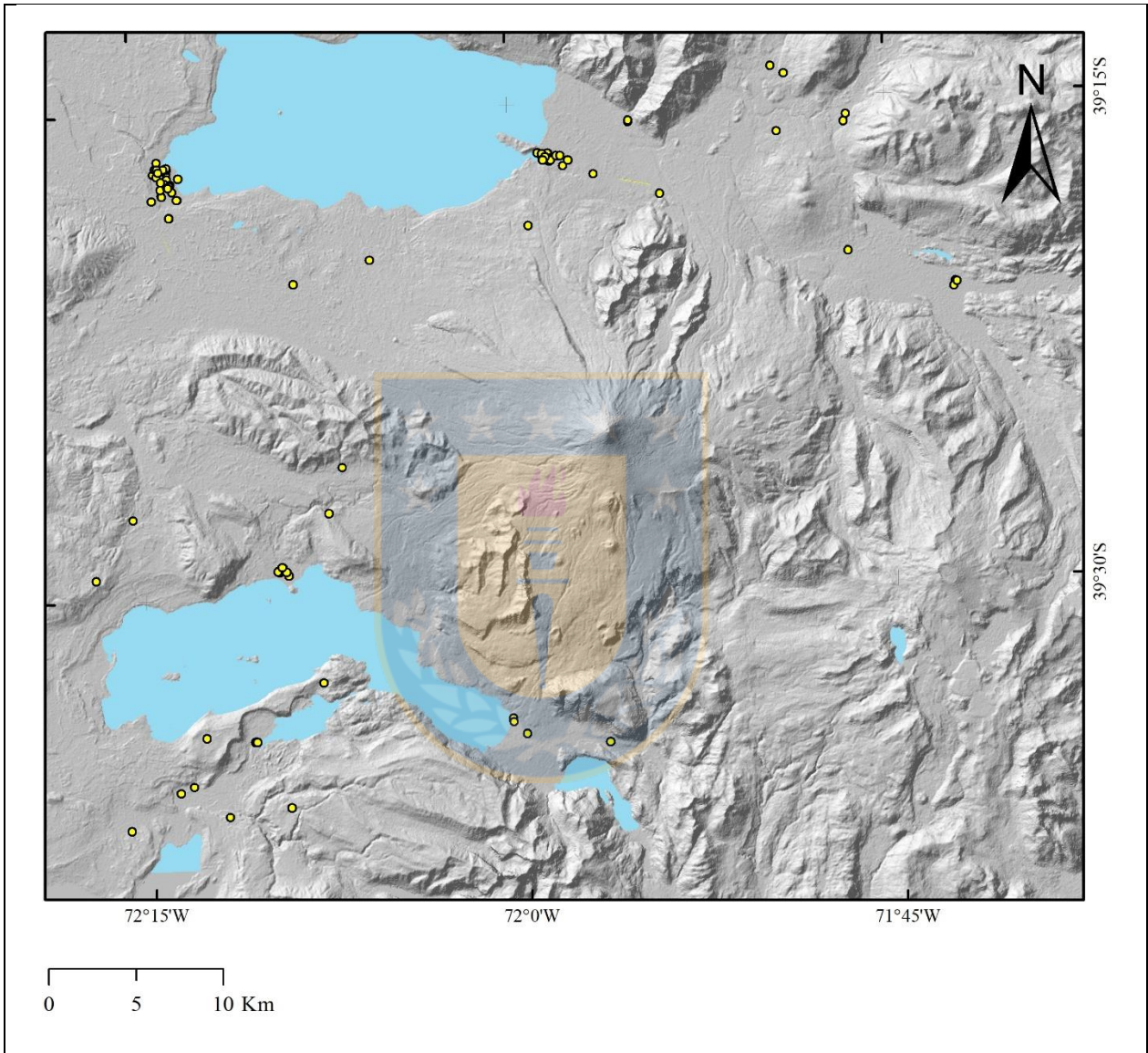


Figura 5.12: Mapa de infraestructura crítica de servicio. En amarillo se representan los aeródromos, la Capitanía de Puerto de Pucón, centros de salud, servicentros, oficinas de la CONAF, la cruz roja, bomberos, defensa civil, escuelas, hospitales, liceos, municipalidades, carabineros, postas de salud y servicios de atención primaria de urgencias. Modificado del MBN (2017-18).

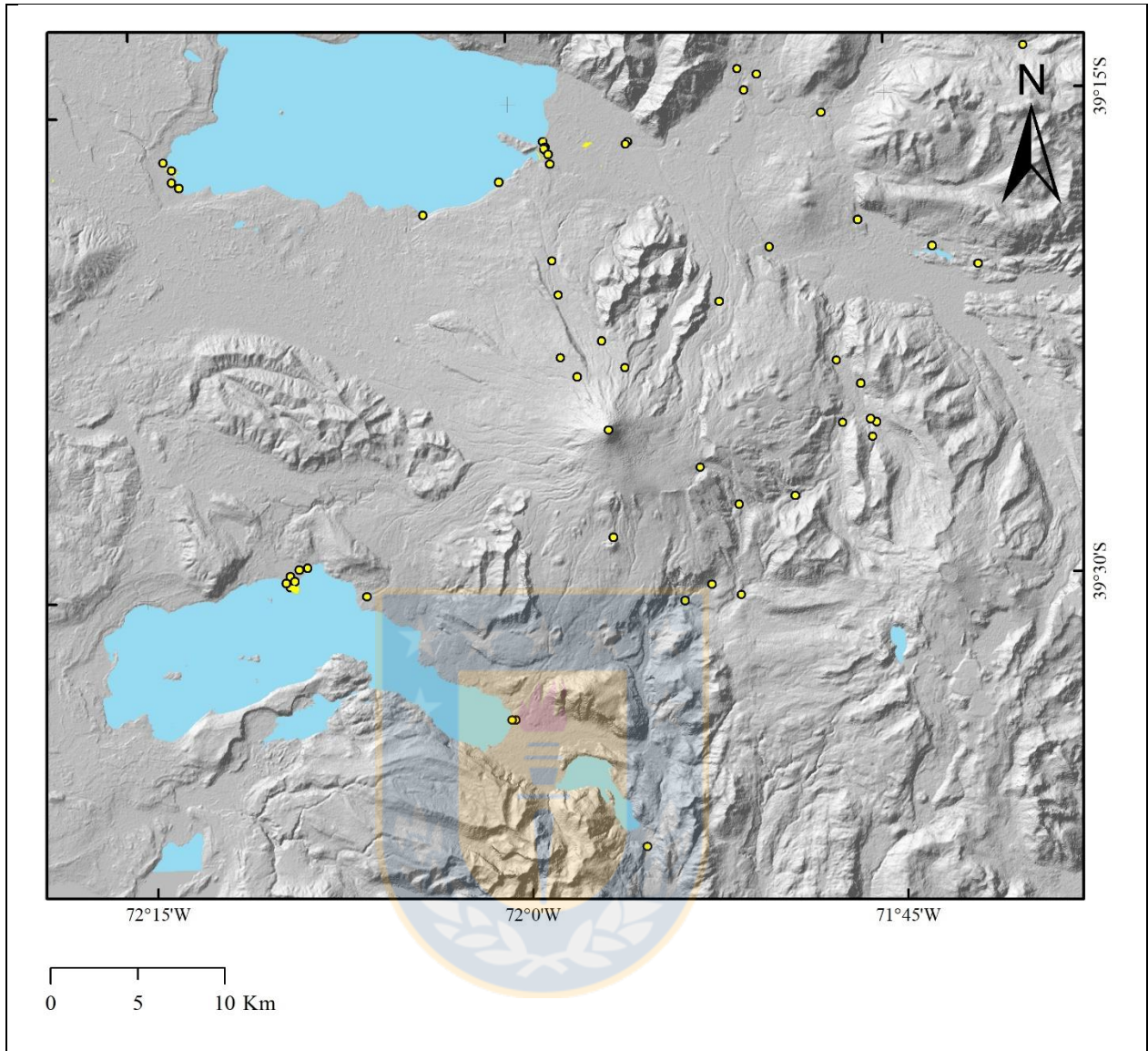


Figura 5.13: Mapa de infraestructura crítica de turismo. En amarillo se representan sitios geológicos, áreas verdes, el casino, edificios eclesiásticos, el centro de esquí, la ciudad del deporte, costaneras, entradas a los parques nacionales, ferias artesanales, mercados, miradores, museos, cascadas, parques, puentes interesantes, playas, senderos, termas, valles y el cráter del volcán. Modificado del MBN (2012).

Por otra parte, son identificados un total de 62 sitios de interés turístico (áreas verdes, mercados, museos, senderos, etc.), del mismo modo que de la base de datos de servicio son adaptados y complementados con sitios nuevos con base en la base de datos de la Infraestructura de Datos Geoespaciales (MBN, 2012).

5.3.1.4. Rutas

La base de datos geolocalizada de infraestructura de rutas (Fig. 5.14) es obtenido directamente de la cartografía del censo (2017) elaborado por la INE, al cual se le añade los senderos de senderismos.

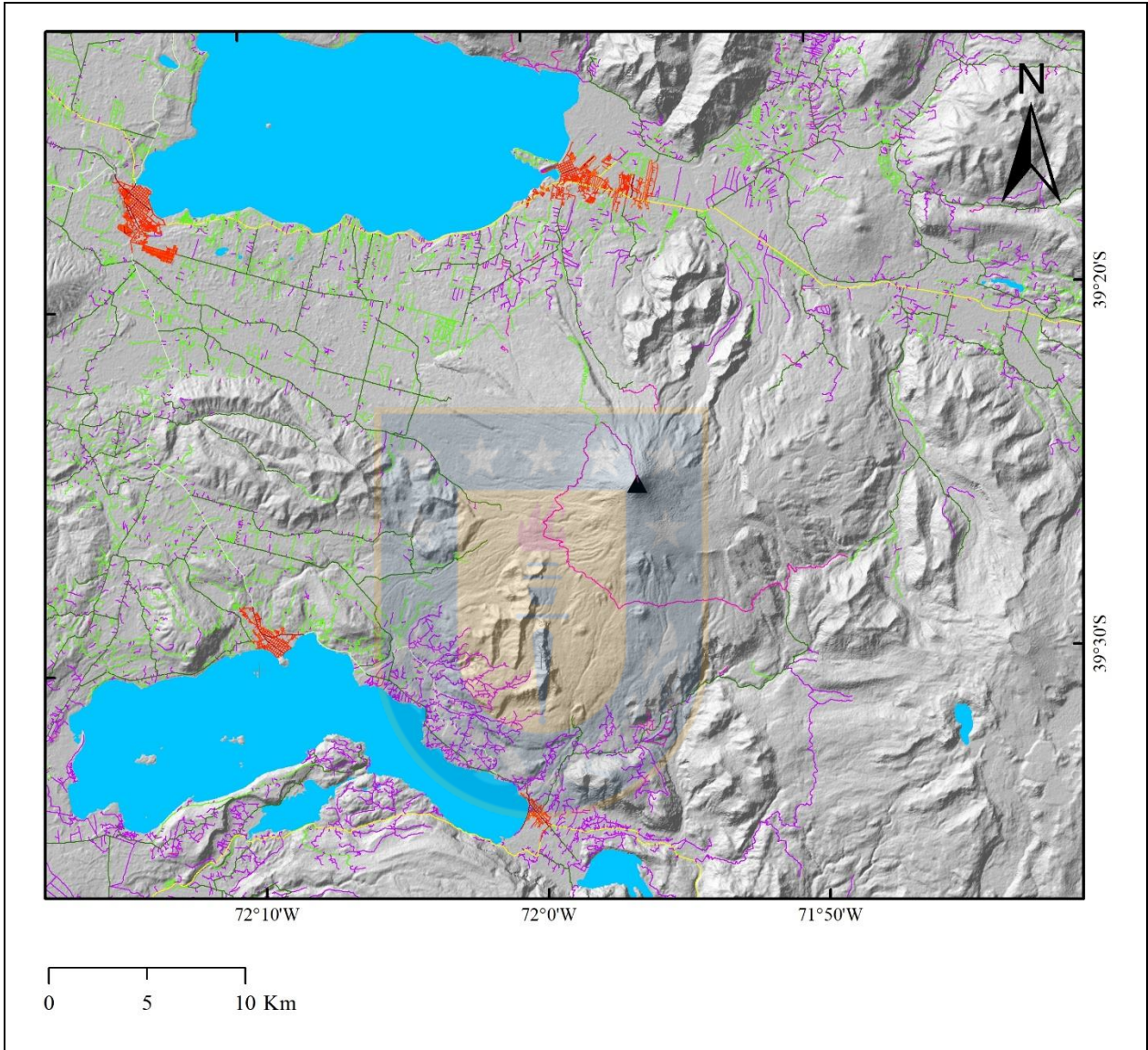


Figura 5.14: Mapa de infraestructura crítica de rutas. Avenidas (rojo oscuro), calles (rojo), caminos (verde), carreteras (amarillo), huellas (morado), pasajes (naranja), vías peatonales (celeste), principales (verde pálido), secundarias (verde oscuro) y senderos (rosado). Modificado del censo (INE, 2017).

Las *rutas* son sitios por donde pueden transitar población tanto permanente, como flotante, por lo tanto, también se incluye en el análisis de exposición. Es posible distinguir las rutas por clase: avenida, calle, camino, carretera, huella, pasaje, peatonal, principal, secundario y sendero.

5.3.1.5. Vías de Evacuación y Puntos de Encuentro

Finalmente, se identifican y geolocalizan las *vías de evacuación* y *puntos de encuentros* actualmente disponibles (Fig. 5.15; Tabla 7 in Anexo 2), los puntos de encuentro corresponden a los puntos transitorios y los albergues. Éstos son los sitios que potencialmente la población se concentrará en caso de una eventual emergencia volcánica. Esta variable no se incluye en los cálculos de exposición, puesto que representa un escenario durante la erupción a diferencia de las otras infraestructuras críticas que representan un escenario previo a la erupción

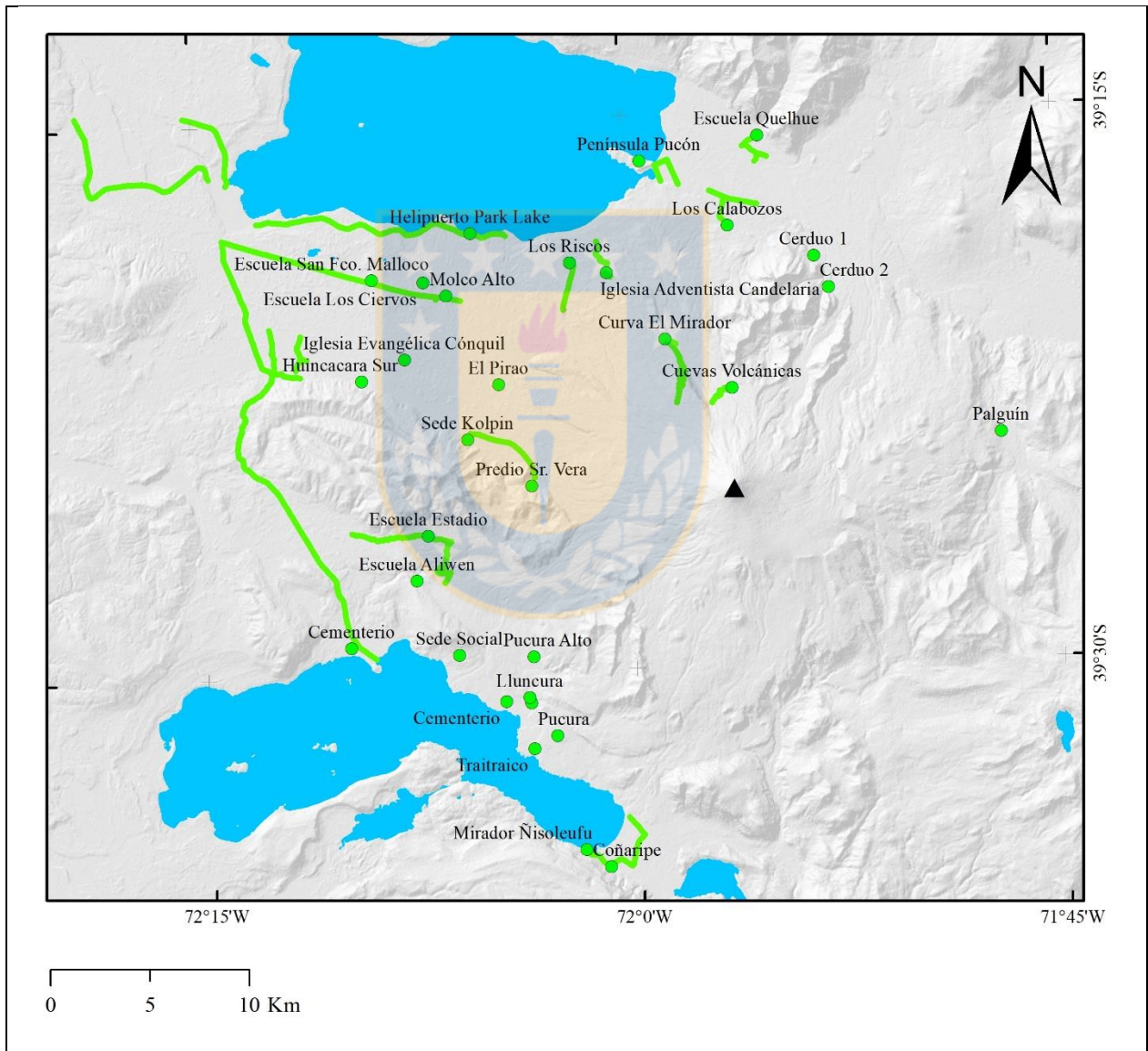


Figura 5.15: Mapa de vías de evacuación y puntos de encuentro. Las líneas verdes representan las vías de evacuación y los círculos verdes los puntos de encuentros, tanto los puntos transitorios, como los albergues. Obtenidos de CONAF, ONEMI y las municipalidades locales.

Las vías de evacuación son trazadas sobre la base de una imagen satelital de *Google Earth*, considerando las descripciones y mapas encontrados en los planes de emergencia volcánica, los cuales son: (1) Plan de Emergencia Volcánica Comuna de Pucón (Municipalidad de Pucón, 2017). (2) Plan de Prevención y de Respuesta por Actividad Volcánica Acevol (Municipalidad de Villarrica, 2011). (3) Plan Específico de Emergencia por Variable de Riesgo Volcánica, Localidad Coñaripe, Comuna Panguipulli (ONEMI, 2017). (4) Plan de Emergencia por Erupción Volcánica Parque Nacional Villarrica Sector Rucapillán (CONAF, 2016).

Las vías de evacuación corresponden a:

- 1) En el Parque Nacional Villarrica sector Rucapillán, desde el centro de esquí, pasando por Juncalillo, o desde la entrada del parque seguir por camino local hasta el punto de encuentro curva El Mirador.
- 2) En el Parque Nacional Villarrica sector Rucapillán, desde el ex refugio, pasando por las cuevas volcánicas, seguir camino local hasta el punto de encuentro ubicado en un sitio dentro de zona boscosa.
- 3) En sector Quelhue, desde el puente Quelhue, seguir la Ruta S-919, hacia la izquierda por la Ruta S-921 hasta camino local, luego, seguir por la derecha hasta el punto de encuentro ubicado en la Escuela Quelhue.
- 4) Desde el Camino Internacional (Ruta CH-199), seguir por el Camino Los Calabozos (Ruta S-933), cerca del servicentro Shell, seguir por el camino hasta el punto de encuentro.
- 5) En la ciudad de Pucón, desde Avenida Colo Colo, pasando por Calle Holzapfel, o directamente desde Calle Caupolicán, seguir por camino hasta el punto de encuentro ubicado en La Península.
- 6) En sector Candelaria, seguir los caminos locales que convergen en la Ruta S-891 que sube hasta el punto de encuentro ubicado en la Iglesia Adventista Candelaria.
- 7) En sector Los Riscos, seguir los caminos locales que convergen en la Ruta S-889 que baja hasta el punto de encuentro ubicado en Los Riscos.
- 8) En el balneario de Coñaripe, desde la Avenida Guido Beck, pasando por la Ruta CH-201, cruzar hasta el punto de encuentro ubicado en Mirador Ñisoleufu.

- 9) En el pueblo de Licán Ray, desde Calle Urrutia, seguir por Camino a Villarrica (Ruta S-95-T) hasta sector Afunalhue, o seguir Camino a Panguipulli (Ruta S-879).
- 10) En sector Pino Huacho, seguir Camino Los Caracoles, pasando por Escuela Estadio, seguir hacia el sector de Cudico por Ruta S-961, subir los cerros aledaños al lugar.
- 11) En sector Challupén, subir los faldeos de los cerros aledaños al lugar, no se recomienda utilizar los caminos locales.
- 12) En sector Huincacara, seguir los caminos locales que suben por el lado norte del cerro Huincacara.
- 13) En sector Molco, desde el Camino Internacional (Ruta CH-199) o desde la Segunda Faja (Ruta S-839) hacia la ciudad de Villarrica.
- 14) En sector Loncotraro, desde la Segunda Faja (Ruta S-839) subir los faldeos de los cerros aledaños al lugar.
- 15) En la ciudad de Villarrica, desde el Camino Internacional (Ruta CH-199) hasta la ciudad de Freire, desde la Ruta S-91 hasta la Ruta 5 Sur (cerca e Pitrufrquén, 702 km), desde Ruta 3-95-T hasta estero Llaullau.

Por otra parte, los puntos de encuentros son graficados con base en el Plano de Evacuación ante Amenaza Volcánica Volcán Villarrica (ONEMI, 2017), mapa previamente georreferenciado en ArcGIS 10.6. Los puntos de encuentro del Parque Nacional Villarrica sector Rucapillán son obtenidos del plan de emergencias de la CONAF, del 2016.

5.3.2. Cuantificación de la Exposición

Previo a la cuantificación de la exposición poblacional y de infraestructura y sitios críticos, se confecciona una malla de 100 x 100 m sobre toda el área que comprende las manzanas y entidades seleccionadas para el análisis de exposición (Fig. 5.8), resultando en 220.454 cuadros con un área de 100.000 m² cada uno, en los cuales se contabilizan el *número de edificios* dentro de cada cuadro con valores del 0 al 69, también el *número establecimientos de alojamiento turístico* con valores del 0 al 4, y el *número infraestructura crítica de servicios y turismo*, con valores del 0 al 2 y del 0

al 1, respectivamente. Luego, se identifican las variables de exposición (Tabla 5.4) las cuales son evaluadas y cuantificadas según los criterios descritos a continuación.

Tabla 5.4: Resumen de las variables de exposición. Se añade su denotación, y mínimo y máximo valor dentro del análisis. Elaboración propia.

Variable de exposición	Denotación	Mínimo valor (diferente a cero)	Máximo valor
Población permanente	P	0,13	226,75
Población flotante máxima	$F_{\text{máx}}$	71,27	1041,94
Población flotante mínima	$F_{\text{mín}}$	2,03	50,42
Infraestructura crítica de servicios	S	1	2
Infraestructura crítica de turismo	T	1	1
Ruta	R	1	3

Población permanente (P): valor que representa la cantidad de población permanente en un cuadro de 100 x 100 m. Se calcula sumando cada uno de los valores puntuales de habitantes por edificio dentro del área del cuadro. El valor de *habitantes por edificio* representa la cantidad de población permanente de una manzana o entidad censal dividido por la cantidad de edificios dentro del área de la misma manzana o entidad censal.

Población flotante máxima ($F_{\text{máx}}$): representa la población flotante en un cuadro de 100 x 100 m. Se calcula sumando cada uno de los valores puntuales de llegadas máxima por establecimiento de alojamiento turístico. El valor de *llegadas máxima por establecimiento de alojamiento turístico* representa la cantidad de llegadas de turistas del febrero de 2018 en una comuna dividido por la cantidad de establecimientos de alojamiento turístico de la misma comuna.

Población flotante mínima ($F_{\text{mín}}$): representa la población flotante en un cuadro de 100 x 100 m. Se calcula sumando cada uno de los valores puntuales de llegadas mínima por establecimiento de alojamiento turístico. El valor de *llegadas mínima por establecimiento de alojamiento turístico* representa la cantidad de llegadas de turistas del junio de 2009 en una comuna dividido por la cantidad de establecimientos de alojamiento turístico de la misma comuna.

Infraestructura crítica de servicios (S): valor que según la cantidad de *infraestructura crítica de servicios* en un cuadro de 100 x 100 m puede ser: “0”, si no existe ninguna; “1”, si existe una; y “2”, si existe más de una.

Infraestructura crítica de turismo (T): valor que según la cantidad de *infraestructura o sitios críticos de turismo* en un cuadro de 100 x 100 m pueden ser: “0”, si no existe ninguno; “1”, si existe uno; y “2”, si existe más de uno.

Ruta (R): valor que según si hay presencia o no de *rutas* en un cuadro de 100 x 100 m puede ser: “0”, no hay ruta; “1”, si hay una ruta de clase huella, secundario o sendero; y “2”, si hay una ruta de clase avenida, carretera, peatonal, principal, calle o pasaje. Las rutas de clase privado o puentes toman el valor de las clases que le rodean. Si existe más de un tipo de clase de ruta en el mismo cuadro, se escoge la que tiene mayor valor. Esta asignación numérica busca representar, en términos muy generales, que algunas clases de ruta tienen mayor potencial de concentrar población que otras.

Finalmente, la fórmula para calcular el *grado de exposición* ($G_{máx\ o\ mín}$), si $P + F_{máx\ o\ mín} > 0$, es la siguiente:

$$G_{máx\ o\ mín} = \text{techo} (1 + \text{Log}_{10}(P + F_{máx\ o\ mín})) + S + T + R$$

Si $P + F_{máx\ o\ mín} = 0$, la fórmula cambia a:

$$G = S + T + R$$

Se utiliza la expresión logarítmica porque permite comparar los valores de la población con los otros parámetros, esto también es utilizado en la evaluación de amenaza de la NVEWS realizada por Ewert *et al.* (2018).

La expresión *techo* permite obtener los resultados en números enteros, facilitando la comunicación de sus resultados, sin perjuicio de eliminar información, puesto que los niveles de exposición no necesitan ser leídos con precisión.

La expresión $\text{techo}(1 + \text{Log}_{10}(P + F_{máx}))$ resulta en valores enteros que van del 1 al 4 y la, $\text{techo}(1 + \text{Log}_{10}(P + F_{mín}))$, resulta en valores enteros que van del 1 al 3. La expresión representa, por lo tanto, la densidad de población tanto permanente, como flotante en un cuadro determinado de la malla de 100 x 100 m.

5.3.3. Resultados de la Evaluación de Exposición

El resultado de calcular el grado de exposición para cada uno de los cuadros de la malla de 100 x 100 m que cubre las manzanas y entidades censales seleccionadas, siendo uno el grado de exposición máximo (Fig. 5.16) y otro de grado de exposición mínimo, con valores enteros del 0 al 7, y del 0 al 6, respectivamente. Tanto el grado de exposición máximo y mínimo varían entre sí solamente en los cuadros donde están distribuidos los establecimientos de alojamiento turístico (Fig. 5.11).

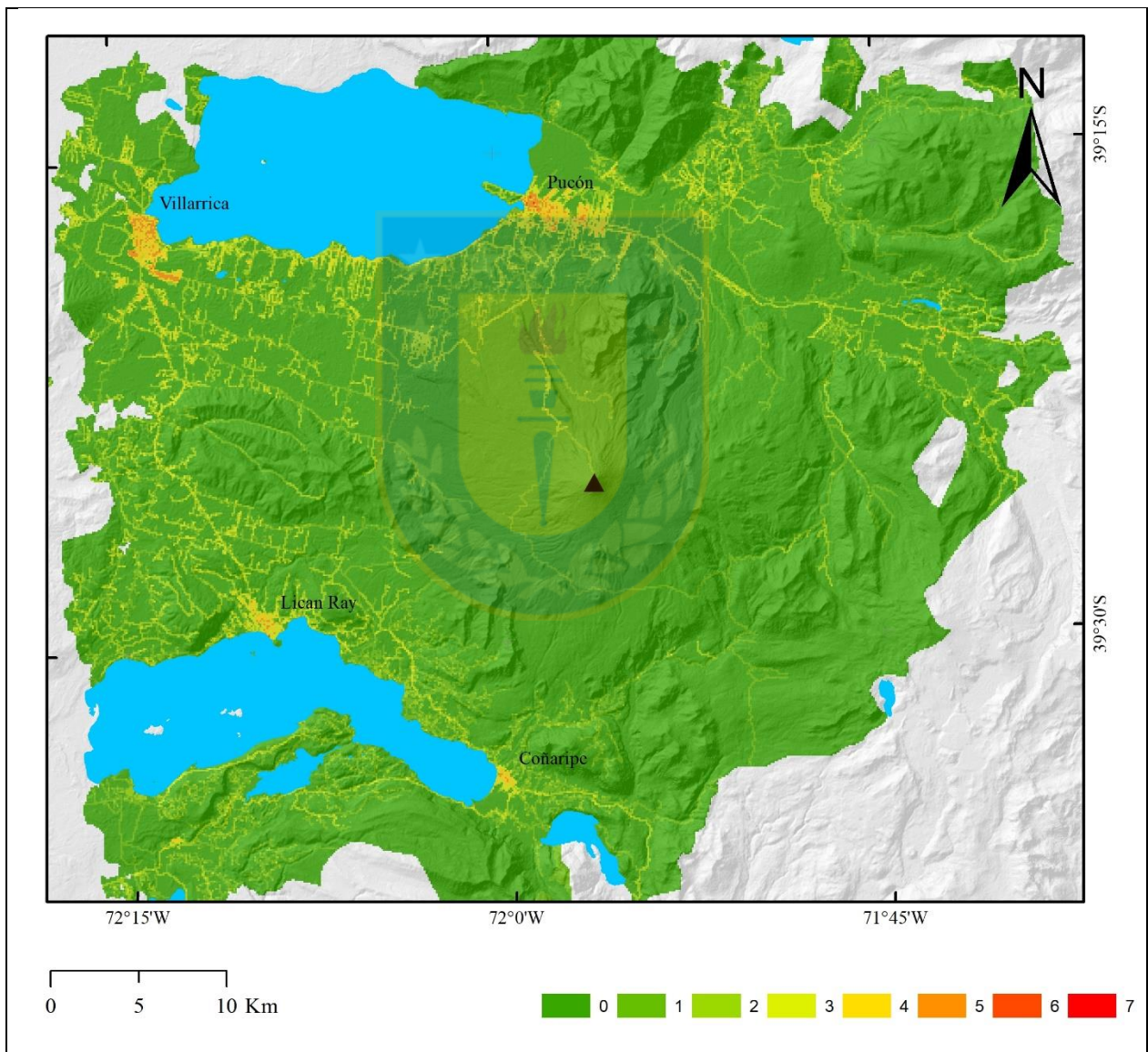


Figura 5.16: Mapa del grado de exposición máxima de los sectores aledaños al volcán Villarrica. La leyenda representa el grado de exposición. Elaboración propia.

Del total del área de la entidad seleccionada, un 15,63% presenta al menos un grado de exposición, 7,69% al menos dos grados, 2,13% al menos tres grados, 0,56% al menos cuatro grados, 0,16% al menos cinco grados, desde los seis grados de exposición el porcentaje es casi 0%.

Los mapas, tanto de exposición máximo, como mínimo, con una vista local de Pucón, Villarrica, Licán Ray, Coñaripe y sector El Volcán pueden ser consultados en el Anexo 3.

Además, se elaboran gráficos de porcentaje acumulativo del grado de exposición asociados a las entidades de Pucón (Fig. 5.17): 61,87% de Pucón tiene al menos un grado de exposición, 53,71%, al menos dos grados, 40,95%, al menos tres grados, 21,65%, al menos cuatro grados, 6,49% y 2,41% al menos cinco grados de exposición máximo y mínimo, respectivamente, 0,37% y 0,10% al menos seis grados máximo y mínimo. Finalmente, 0,05% y 0,00% al menos siete grados máximo y mínimo.

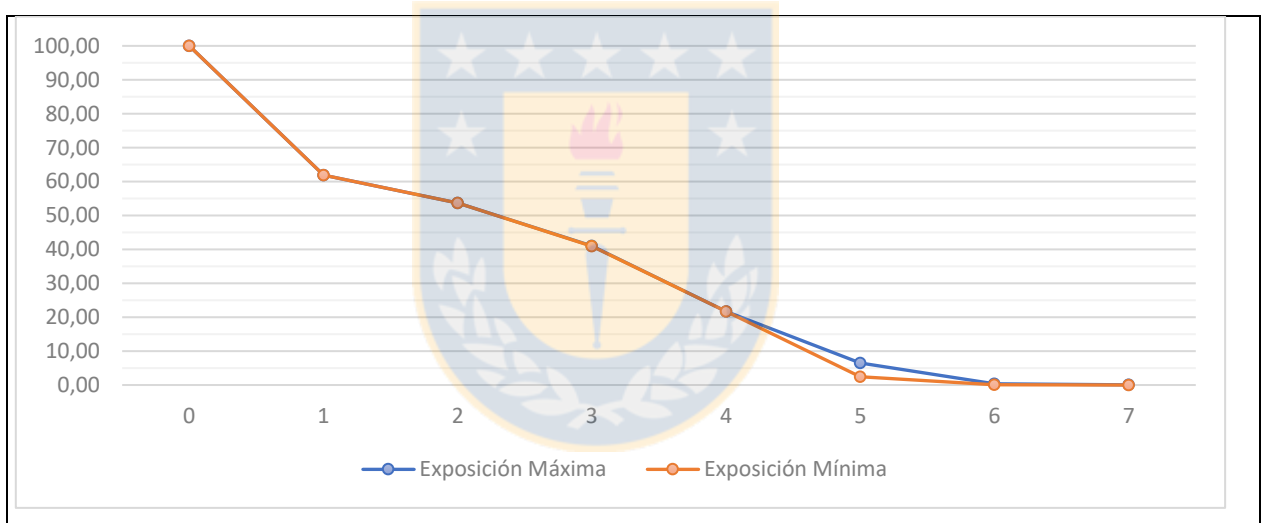


Figura 5.17: Gráfico de exposición máxima y mínima de Pucón. Porcentaje acumulativo de cada grado de exposición máximo y mínimo. Elaboración propia.

De las entidades de Villarrica (Fig. 5.18): 78,34% de Villarrica tiene al menos un grado de exposición, 74,20%, al menos dos grados, 67,57%, al menos tres grados, 58,58%, al menos cuatro grados, 21,07% y 14,56% al menos cinco grados de exposición máximo y mínimo, respectivamente, 0,47% y 0,36% al menos seis grados máximo y mínimo. Finalmente, 0,0% al menos siete grados de exposición.

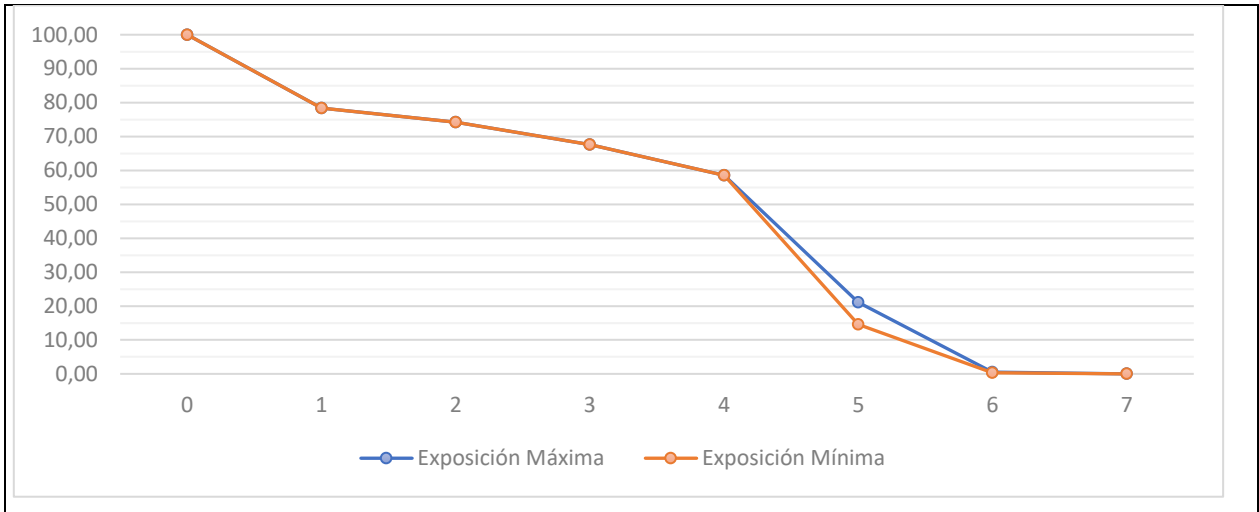


Figura 5.18: Gráfico de exposición máxima y mínima de Villarrica. Porcentaje acumulativo de cada grado de exposición máximo y mínimo. Elaboración propia.

De las entidades de Licán Ray (Fig. 5.19): 55,93% de Licán Ray tiene al menos un grado de exposición, 49,13%, al menos dos grados, 37,95%, al menos tres grados, 13,32%, al menos cuatro grados, 2,93% y 0,27% al menos cinco grados de exposición máximo y mínimo, respectivamente, 0,13% y 0,00% al menos seis grados máximo y mínimo. Finalmente, 0,0% al menos siete grados.

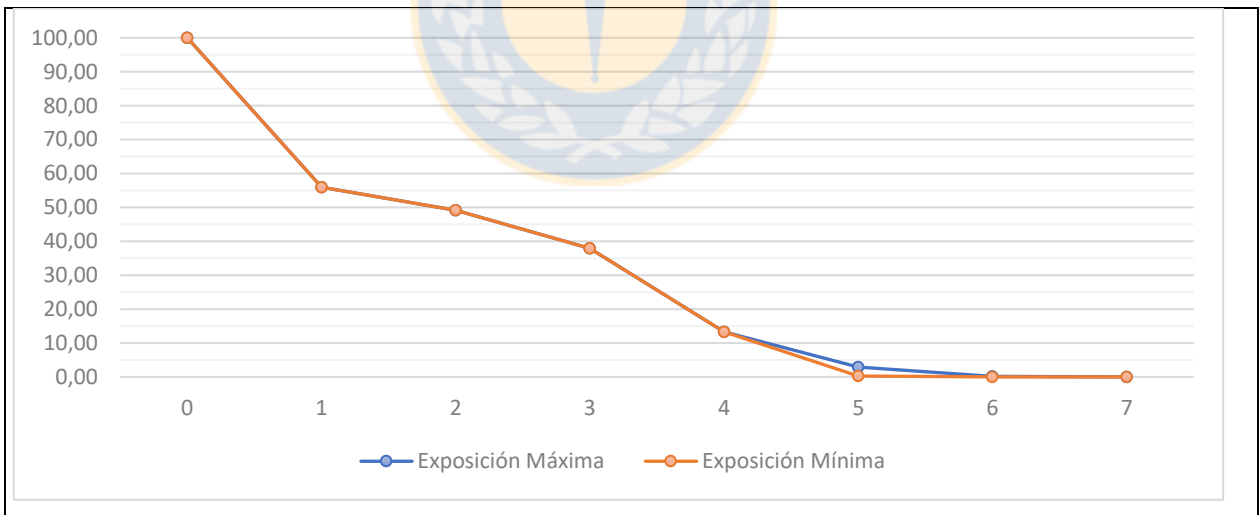


Figura 5.19: Gráfico de exposición máxima y mínima de Licán Ray. Porcentaje acumulativo de cada grado de exposición máximo y mínimo. Elaboración propia.

De las entidades de Coñaripe (Fig. 5.20): 50,63% de Coñaripe tiene al menos un grado de exposición, 38,24%, al menos dos grados, 25,21%, al menos tres grados, 13,03% y 11,34% al

menos cuatro grados de exposición máximo y mínimo, respectivamente, 1,26% y 0,21% al menos cinco grados máximo y mínimo. Finalmente, 0,0% al menos seis y siete grados de exposición.

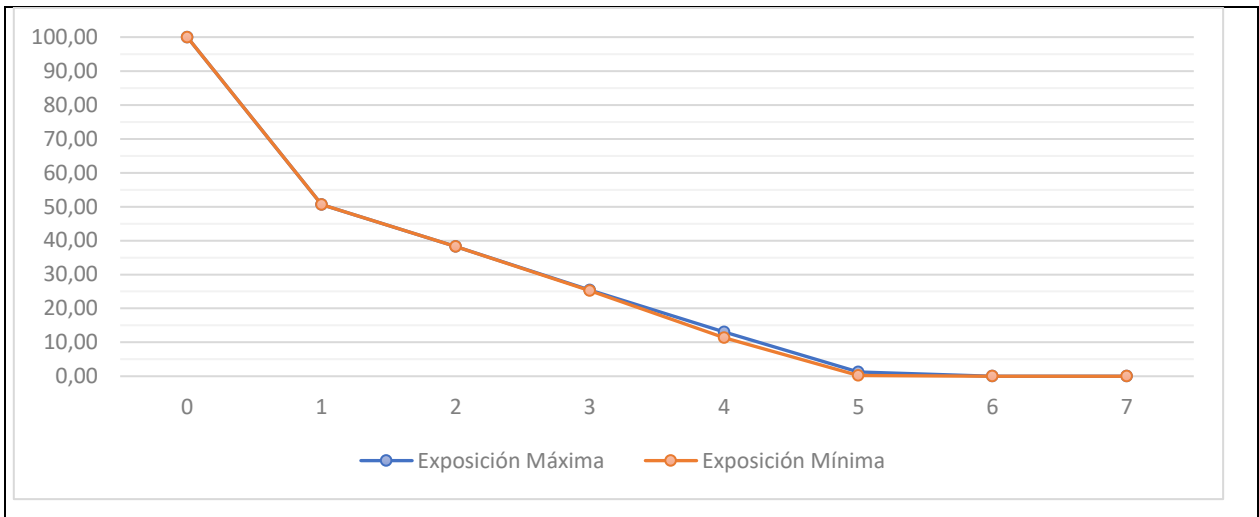


Figura 5.20: Gráfico de exposición máxima y mínima de Coñaripe. Porcentaje acumulado de cada grado de exposición máximo y mínimo. Elaboración propia.

Finalmente, de las entidades de sector El Volcán (Fig. 5.21): 10,23% de sector El Volcán tiene al menos un grado de exposición, 4,33%, al menos dos grados, 0,39%, al menos tres grados, 0,08% y 0,06% al menos cuatro grados de exposición máximo y mínimo, respectivamente, 0,03% y 0,00% al menos cinco grados máximo y mínimo, finalmente, 0,0% al menos seis y siete grados.

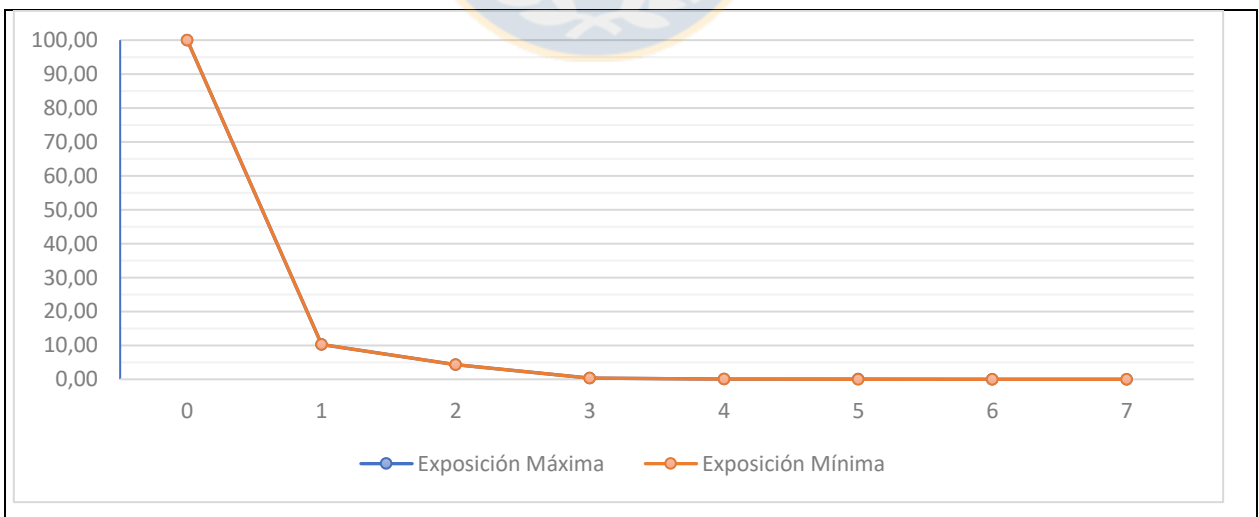


Figura 5.21: Gráfico de exposición máxima y mínima sector El Volcán. Porcentaje acumulado de cada grado de exposición máximo y mínimo. Elaboración propia.

5.4. Resultados de la Evaluación de Amenaza del Volcán Villarrica

La evaluación de amenaza del volcán Villarrica se efectúa intersecando la base de datos geolocalizada de peligros integrados del volcán Villarrica (Fig. 5.6) con la base de datos geolocalizada del grado de exposición de los sectores aledaños al volcán Villarrica (Fig. 5.16). El cálculo se realiza de un modo similar al utilizado por la USGS (Ewert *et al.*, 2018). Es decir, se realiza una operación matemática que consiste en aplicar la función techo sobre la multiplicación del grado de peligrosidad con el grado de exposición máximo y mínimo, ambos, independientemente. De esto se obtiene el grado de amenaza máximo y mínimo, con valores enteros del 0 al 480 para ambas operaciones. Nuevamente los resultados son expresados en números enteros para facilitar su comunicación, siendo que éstos tampoco necesitan ser expresados con demasiada precisión, al menos para los usuarios no especializados.

La diferencia entre ambos análisis de amenaza (máxima y mínima) solamente afecta los cuadros de la malla que tienen amenaza distinta a cero y contienen al menos un establecimiento de alojamiento turístico. Además, en los resultados del análisis de exposición del subcapítulo anterior se determina que las diferencias de valor entre la exposición máxima y mínima solo son observables principalmente, entre los grados 4 y 5, y 6 y 7: y además la cantidad de cuadros de la malla que tienen una variación no superan los 7% del total. Por lo tanto, en términos generales, mostrar los resultados de amenaza máxima y mínima puede resultar redundantes para los propósitos de este trabajo. Por lo tanto, solo son mostrados los resultados de la amenaza en el escenario de amenaza máxima.

Entonces, se confecciona un mapa de amenaza del volcán Villarrica (Fig. 5.22) considerando los procedimientos anteriormente descritos. Resultando que, del total del área de las entidades seleccionadas, alrededor del 9% está amenazado por el volcán Villarrica. En el mapa se muestran además los puntos de encuentro, tanto los transitorios, como los albergues establecidos en los planes de emergencia. También se muestran las principales rutas, para que, de modo general, se pueda apreciar la accesibilidad.

En el Anexo 5 es posible consultar mapas detallados de amenaza máxima del volcán Villarrica de Pucón, entre los sectores Huincacara y Molco, Licán Ray, Coñaripe, Palguín y El Volcán, donde también se muestran los puntos de encuentro y, además, las vías de evacuación, rutas, infraestructura y sitios críticos.

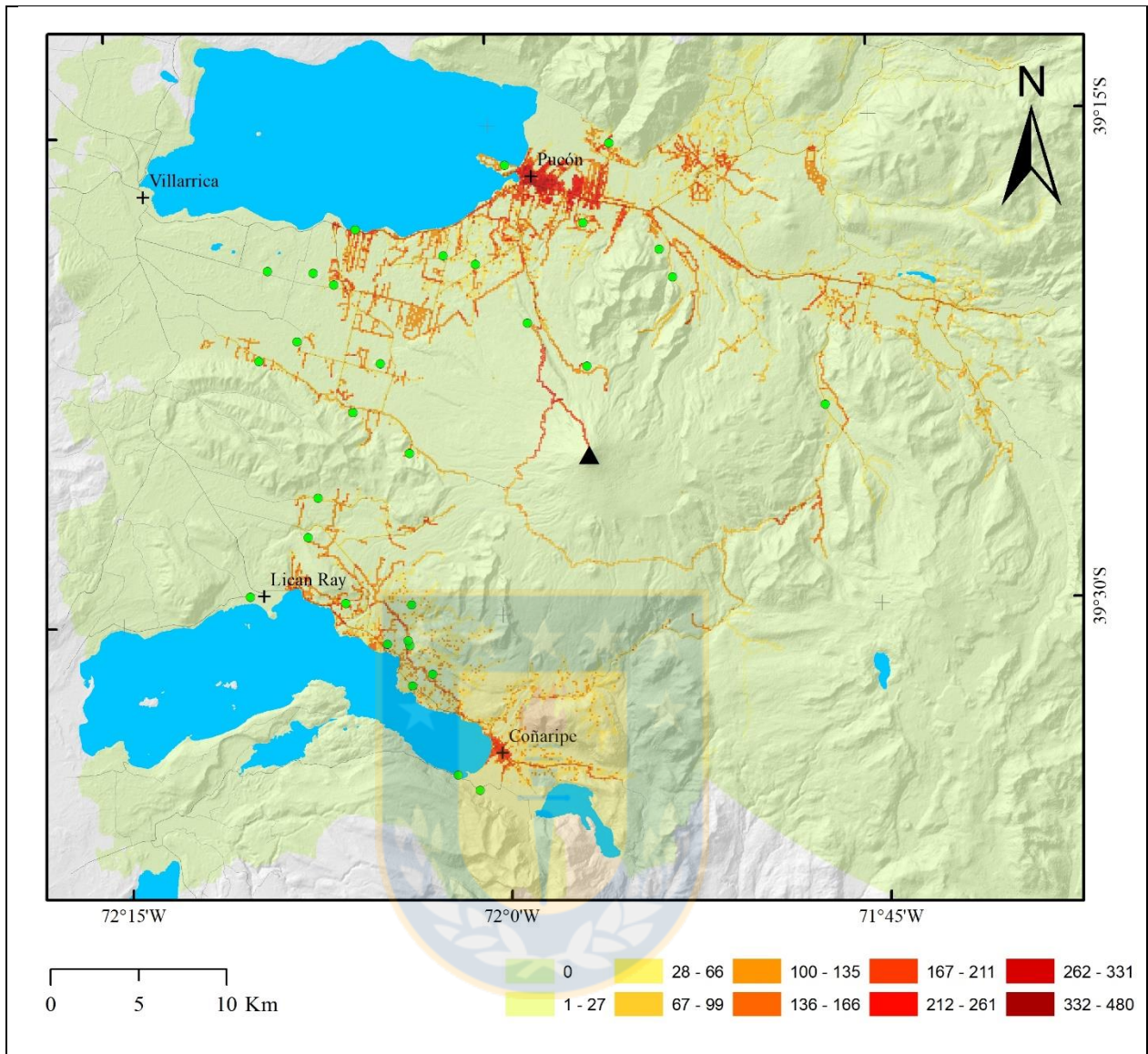


Figura 5.22: Mapa de amenaza máxima del volcán Villarrica. En la leyenda se muestra el grado de amenaza. Los círculos verdes representan los puntos de encuentro definidos en los planes de emergencia. Las líneas grises tenues son las principales rutas. Elaboración propia.

Por otro lado, se calcula el promedio de la amenaza y su desviación estándar, y se determinan el valor mínimo y máximo dentro de la entidad, de un total de 368 entidades (Tabla 1 *in* Anexo 4). El promedio se obtiene de los grados de amenaza de cada cuadro de la malla de 100 x 100 m que está más cercano a una entidad determinada, resultando en valores del 0 al 124 (redondeado a números enteros). El mapa de amenaza máxima por entidad (Fig. 5.23) permite una consulta más eficiente de la amenaza al distribuir geográficamente el grado de amenaza en grandes áreas. Se debe

considerar que, en el cálculo de la amenaza promedio por entidad, un cuadro de la malla de 100 x 100 m tiene la posibilidad de ser contabilizado en una entidad u otra adyacente si ésta se ubica en los límites de las mencionadas entidades. En consecuencia, algunas pocas entidades de muy pequeño tamaño tenían amenaza cero, porque dicha entidad no contabilizaba ningún cuadro de la malla de amenaza, para solucionar estos vacíos, se optó por unir esas entidades pequeñas a otras de mayor tamaño, las cuales son: Pasaje Ruby unido a Lorena, entidad Villa Santa Rosa unido a Villa Aviación. Todas las manzanas de Pucón, Licán Ray y Coñaripe se unen a las entidades con sus mismos nombres.

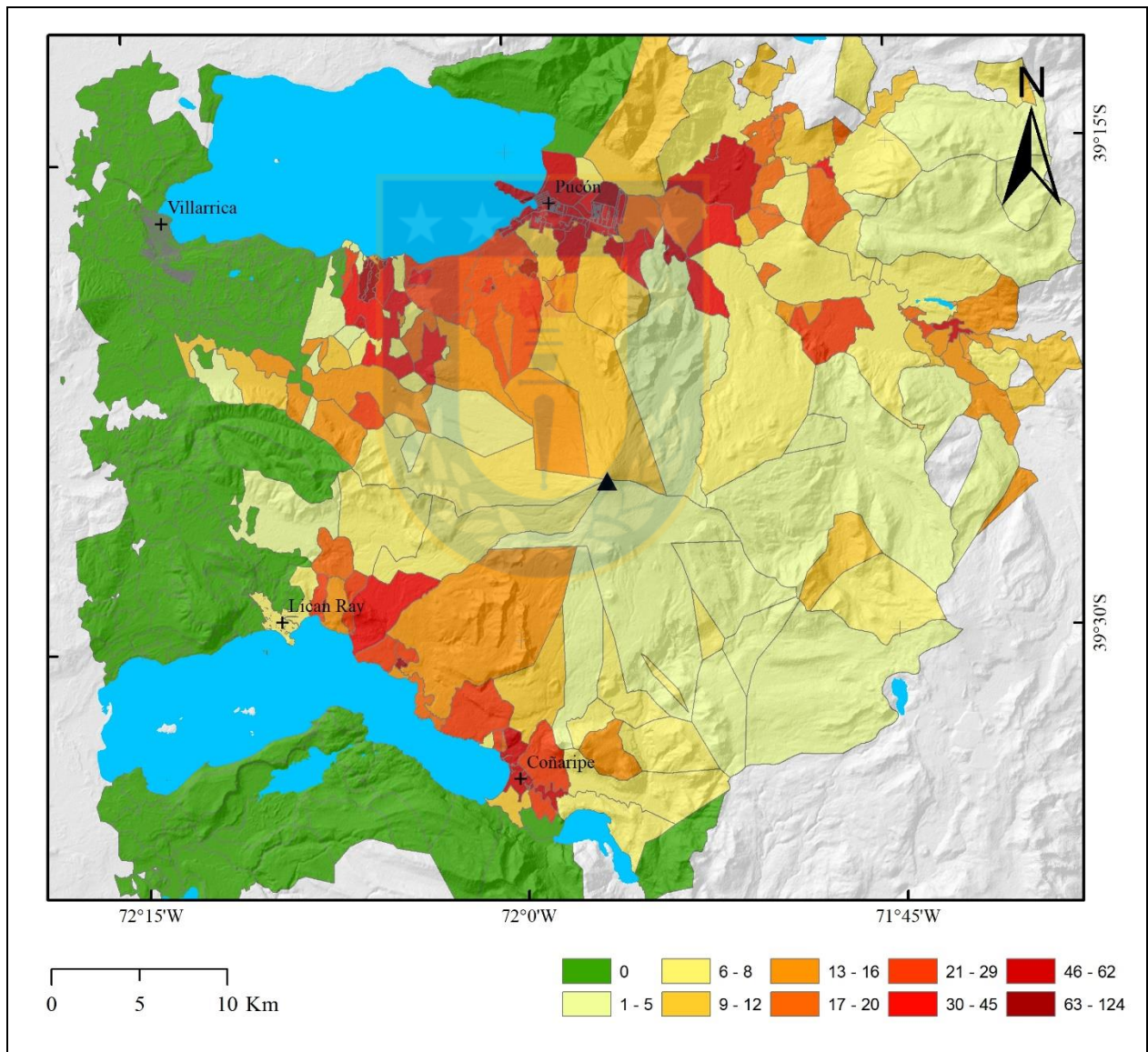


Figura 5.23: Mapa de amenaza máxima promedio por entidad del volcán Villarrica. La leyenda representa el grado de amenaza promedio. Elaboración propia.

Del promedio, las cinco primeras entidades con mayor amenaza son las parcelas de Hueney en la localidad de Loncotraro (124), los caseríos de Chosco Alto (120), las parcelas de Villa Julia (120) y las parcelas del Parque Coinco (94) en la localidad de Villa Julia (120), y los caseríos de Molco en la localidad de Molco (92). Pucón (62) está en la posición n°13 de amenaza, Licán Ray (8) en la posición n°111, Coñaripe (61) en la posición n°14 y Palguín (8) en la posición n°100. En el sector El Volcán, Pasaje Arraigada (58) está en la posición n°16 y Turbina Alta (48) en la posición n°22.

Por otra parte, se elabora un gráfico que organiza la información de la amenaza promedio por entidades en las comunas de Pucón, Coñaripe y Palguín (Fig. 5.24).

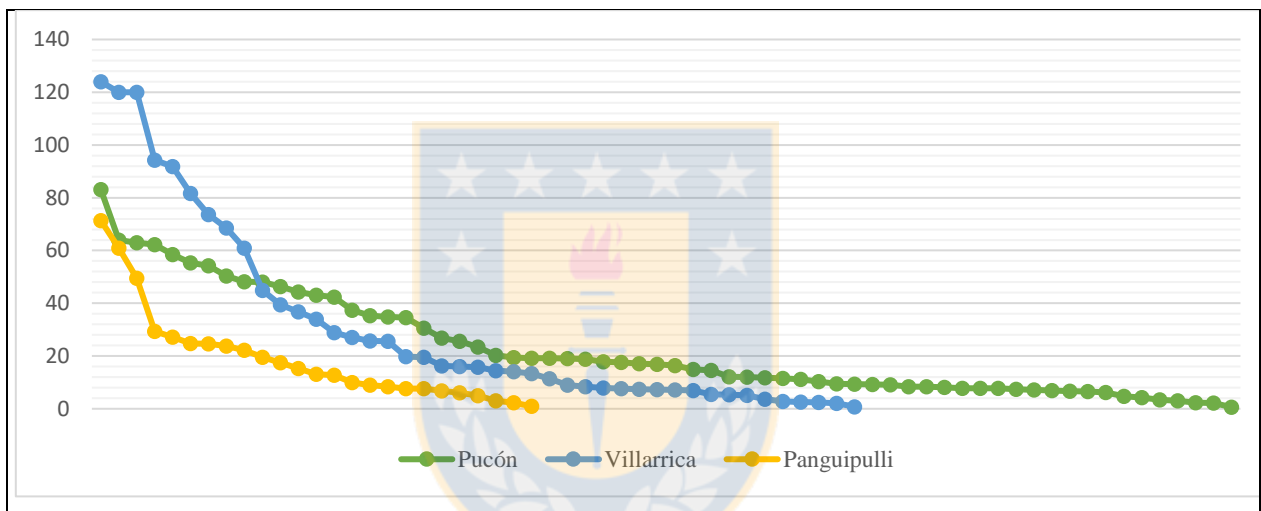


Figura 5.24: Gráfico de amenaza promedio por comuna. Se dividen las entidades por comunas, considerando solo las entidades analizadas en este trabajo. Elaboración propia.

La comuna de Villarrica tiene una mayor amenaza promedio (124) a Pucón (83) y, a su vez, a Panguipulli (71), sin embargo, Pucón tiene una mayor cantidad de entidades amenazadas (64) que Villarrica (43) y Panguipulli (25).

5.5. Discusiones

Para el análisis de amenaza del volcán Villarrica se seleccionan escenarios de peligro volcánicos, con sus respectivos modelamientos y cuantificación del grado de peligrosidad, así como también se establecen escenarios de exposición según la información censal, con su respectivas

distribuciones geográficas y cuantificación del grado de exposición. Finalmente, se calcula el grado de amenaza a partir de los grados de peligrosidad y de exposición. Cada etapa está acompañada de circunstancias y decisiones que comprenden limitaciones e incertidumbres asociadas a los resultados finales. En este subcapítulo se discuten las limitaciones e incertidumbres tanto las inherentes a cualquier análisis, como las asociadas a decisiones tomadas, principalmente, en el análisis de exposición y amenaza. Además, se añaden propuestas y sugerencias para mejorar o complementar el presente trabajo, así como propuestas de utilización para futuros trabajos.

5.5.1. Análisis de Peligro Volcánico

La complejidad intrínseca de los fenómenos volcánicos y las limitaciones en el conocimiento, como registros geológicos e históricos incompletos, son unas de las limitaciones propias de cualquier análisis de peligro volcánico. Nuevos estudios acerca de la naturaleza de los fenómenos volcánicos y sus relaciones casuales, así como nuevas observaciones o técnicas aplicadas en terreno, pueden mejorar la certidumbre de los análisis de peligro.

Respecto a la selección de los escenarios de peligro volcánico, se utilizaron todos los escenarios propuestos por Jorquera (2018), Álvarez (2020) y Arias (2020), incluyendo escenarios poco probables en el análisis, como la zona 1, 5 y 6 de lavas, la zona 2 y 3 de las corrientes de densidad piroclásticas, y la zona 2, 3 y 4 de proyectiles balísticos. Esto tiene como consecuencia que incluso zonas consideradas de seguridad, como la península de Pucón, Los Calabozos y Curva el Mirador, posean algún grado de amenaza. Esto puede considerarse como una señal de advertencia para los encargados de emergencias, significando que incluso las zonas de seguridad también podrían ser afectadas a largo plazo por una erupción con magnitud mayor de la habitual.

Debido a que escenarios de mayor magnitud de lahares y caída de tefra no fueron modelados, es posible que los resultados de la amenaza para fenómenos volcánicos de escenarios prehistóricos de gran magnitud sean subestimados, especialmente en el caso de lahares, los cuales su zona de inundación puede tener mucho mayor alcance, como es observado en otras evaluaciones de peligro volcánico (Moreno, 2000).

Una propuesta interesante para complementar a futuro este tipo de análisis es la inclusión de otros peligros naturales como inundaciones y avalanchas de detritos, los cuales pueden ser integrados a

medida que puedan ser definidos en función de puntajes de recurrencia conocida, alcance zonal y potencial de impacto directo.

5.5.2. Análisis de Exposición

1) La complejidad del comportamiento y evolución de la población y las limitaciones del conocimiento también son propios del análisis de exposición. Este tipo de análisis debe ser constantemente actualizados con nueva información censal. En Chile, la información de población flotante es actualizado mes a mes, en cambio, la información de población permanente cada 10 años. A pesar, de que dichos escenarios poblacionales varían tanto a corto, como largo plazo, al ser tratados logarítmicamente y sometidos a la función techo en la evaluación del grado de exposición, la sensibilidad de estas variaciones no es tan importante para el resultado final. Por otro lado, de la información sobre la infraestructura y sitios críticos de servicios y turismo se desconoce sus periodos de actualización. Sin embargo, cada información tiene su año, lo cual indica el grado de desactualización de cada una de las fuentes ocupadas. Del mismo modo, la información acerca de las rutas es actualizadas cada año y, finalmente, los planes de emergencia volcánicas son actualizados según las prioridades de cada municipalidad.

2) Una base de datos de población permanente perfecta implicaría tener la información de habitantes real por cada vivienda encuestada y geolocalizada, sin embargo, la información del censo 2017 más específica disponible es por manzana o entidad censal. En las zonas urbanas es posible encontrar la información muy detallada puesto que el tamaño de las manzanas son apropiadamente de 100 x 100 m, sin embargo, en las zonas rurales las entidades abarcan áreas bastante más grandes. Por otro lado, se marcan los edificios punto por punto sobre una imagen satelital. La cantidad de edificios marcados tienen una diferencia de 49,5% más que las viviendas censadas, lo cual no es extraño considerando que muchos edificios no son viviendas, sino que tienen funciones comerciales o de administración. Bajo las limitaciones en la información disponible, se opta por distribuir equitativamente la cantidad de habitantes encuestados en cada uno de los edificios marcados punto por punto, lo cual significa que cada edificio tiene una cantidad de población diferente a la real, pero que representa el total de habitantes de la manzana o entidad censal.

3) Para realizar el análisis de exposición con una alta resolución espacial se grafican los edificios encontrados punto por punto sobre una imagen satelital. Este proceso tiene sus propias implicancias en la incertidumbre del análisis puesto que, en una imagen satelital con vista vertical, donde solo es posible observar los techos de los edificios, es posible, por un lado, confundir viviendas u otros edificios con establos, almacenes u otro tipo de infraestructura y, por el otro, algunas infraestructuras pueden quedar ocultas por el reflejo fuerte del sol en el techo o por las sombras de los bosques frondosos. Además, infraestructuras con formas complejas y concentraciones de muchas infraestructuras en un mismo sector tiene como consecuencia que marcar uno u otro punto tenga cierto grado de subjetividad. Este problema podría ser resuelto si durante un hipotético censo se marcara los edificios habitados con GPS.

4) La selección de llegadas de pasajeros a establecimientos de alojamiento turístico también implica una variación en los resultados del análisis de exposición, aunque como fue mencionado en el primer punto, el tratamiento matemático, finalmente, hace que esta variación no sea tan significativa en el resultado final del análisis. Sin embargo, cambiar el escenario de llegadas de pasajeros en una escala de tiempo diferente, como por día o por temporada, podría variar el análisis de manera más considerable.

5) La evaluación de exposición también es sensible a la asignación de puntaje de la infraestructura o sitios de servicio y turismo establecidos. Por ejemplo, en este trabajo no se consideraron los supermercados o grandes tiendas, que también tienen el potencial de concentrar una gran cantidad de personas en horario pico.

6) De la misma manera que en la población permanente, una base de datos ideal de población flotante implicaría conocer la cantidad de llegada de pasajeros por establecimiento de alojamiento turístico real. Sin embargo, esa información es confidencial, por lo cual se opta por distribuir equitativamente la cantidad de llegada de pasajeros de manera equitativa en el total de establecimientos de alojamiento turístico geolocalizados uno por uno de una base de datos encontrado en el SERNATUR.

7) Tanto la base de datos de las escuelas (MBN, 2017-2018), como la del SERNATUR no es totalmente confiable puesto que contiene información incompleta, con ubicaciones incorrectas e inexactas, pero al menos es referencial en cuanto la dispersión y concentración de las escuelas y los establecimientos de alojamiento turístico.

8) La cantidad de llegadas de pasajeros podría verse subestimada si se considera que posiblemente no todos los establecimientos de alojamiento turístico están registrados en las bases de datos de la INE y el SERNATUR.

9) Una incertidumbre importante al utilizar información poblacional, es que las personas no permanecen siempre dentro de las viviendas o establecimientos de alojamiento turístico. Esto es tratado en este análisis asignando un mayor puntaje al grado de exposición en los sectores que contienen infraestructura y sitios críticos de servicios y turísticos, y en las rutas, poseyendo estos sitios el potencial de concentrar tanto población permanente, como flotante. También esta incertidumbre es tratada levemente al utilizar una malla de 100 x 100 m, puesto que permite un margen de movilidad poblacional dentro de un área de 100.000 m². Una forma posible de tratamiento a este problema es la creación de un ráster de densidad poblacional utilizando *Kernel* u similar.

10) Cada una de las bases de datos fueron elaborados por diferentes entidades públicas y funcionarios distintos, se desconoce el método del cómo fueron ubicados espacialmente cada uno de éstos, por lo que es posible que existen pequeñas discrepancias geoespaciales entre uno u otro (incluidas las de elaboración propia). Esta problemática se ha intentado solucionar modificando la ubicación de la mayoría de los elementos vulnerables sobre la misma imagen satelital. Por otro lado, estas discrepancias son tratadas levemente al utilizar una malla de 100 x 100 m para el análisis de exposición, puesto que dentro de un área de 100.000 m² es irrelevante la posición exacta de un punto concreto, pero también podría significar un cambio abrupto de posición si esa diferencia es encontrada en los límites de los cuadros de la malla.

11) La confección de una malla distinta a la de 100 x 100 m (por ejemplo, de 10 x 10 m, o 1.000 x 1.000 m) tiene como consecuencia que el resultado del análisis de exposición cambie, porque hay variables que dependen de la densidad de edificios, densidad de establecimientos de alojamiento turístico y número de infraestructura de servicios y turismo dentro de un área determinada de la malla. Esto tiene como consecuencia que los resultados no serían comparables entre análisis con diferentes resoluciones. La elección de la resolución de la malla depende con que detalle se quiere trabajar según las problemáticas u objetivos del análisis.

12) Una propuesta para futuros trabajos es realizar también un análisis de exposición de infraestructura, esto involucra identificar y geolocalizar edificios, áreas de uso económico de suelos

(como suelos agrícolas y forestales) e infraestructura asociada a redes eléctricas, canaletas de agua, etc. Este tipo de análisis puede ser utilizado con la finalidad de calcular posibles pérdidas o para usar como insumo para una evaluación de amenaza para planificación territorial.

5.5.3. Análisis de Amenaza Volcánica

El análisis de amenaza condensa todas las limitaciones e incertidumbres utilizadas tanto en el análisis de peligro, como de exposición, sumando a ello las limitaciones e incertidumbre propias del método y del cálculo asociado al grado de amenaza en cada uno de sus formatos.

En primer lugar, se opta por mostrar los resultados únicamente asociado a la amenaza máxima, esto quiere decir que los resultados reflejan un periodo de temporada alta de turismo. Sin embargo, no resulta muy diferente de la amenaza mínima en términos globales. Una de las limitaciones de esta evaluación es que la influencia de llegada de turistas solo afecta a puntos muy concretos, esta problemática podría ser resuelta, por ejemplo, calculando un ráster de densidad de población flotante, lo cual podría ser considerado para futuros trabajos.

Los resultados presentados como amenaza promedio por entidad son calculados sobre entidades que poseen áreas muy diversas y con valores de amenaza que son bastantes dispersos (con desviaciones estándar que, en muchos casos, superar el valor del promedio). Por esto, se deben tener algunas consideraciones respecto a cómo se interpreta esta información: por un lado, un área pequeña cerca de una zona urbana puede concentrar mucha infraestructura crítica y, por lo tanto, tener una alta amenaza promedio y, por el otro, un área grande en una zona rural puede tener una baja concentración de infraestructura crítica y, por lo tanto, una baja amenaza promedio (considerando un mismo grado de peligrosidad).

Además, las entidades no distinguen topografía, por lo que, mientras más grande es el área, menor es la representatividad de su amenaza promedio. Por ejemplo, la unión de la Península de Pucón con el centro de Pucón en una sola entidad tiene como consecuencia que la amenaza promedio de la Península este sobreestimada en un sitio y subestimada en el otro. A pesar de todas estas limitaciones, los resultados de la amenaza promedio tienen el potencial de mostrar tendencias globales dentro de la zona de estudio.

Los resultados de amenaza volcánica en diferentes formatos proporcionan variaciones en cómo es percibida la información según lo establecido en el subcapítulo 2.4.1. Los formatos de la tabla de amenaza promedio por entidad, del mapa de amenaza en la malla 100 x 100 m y del mapa de amenaza promedio por entidad, son similares a los formatos de la tabla, de los puntos discretos y las coropletas, respectivamente, de la investigación de Severtson & Vatovec (2012). Por lo tanto, es posible especular que el mapa de amenaza promedio por entidad presente un mensaje más fuerte, urgente y global de amenaza, una menor eficacia y una mayor eficiencia; en cambio el mapa de amenaza en la malla 100 x 100 m presente un mensaje de amenaza más atenuado, una mayor eficacia y una menor eficiencia. Finalmente, la tabla puede ser utilizada para consultar información concreta, franca y específica.

La utilización de los diferentes formatos del mapa también cambia, por ejemplo, es recomendable utilizar los mapas de amenaza locales para definir vías de evacuación, puesto que proporcionan un mayor detalle. Por otro lado, si se quieren asignar recursos económicos y humanos a diferentes localidades, posiblemente la tabla y el mapa de amenaza promedio por entidad sea más fácil de utilizar para esos propósitos, puesto que tanto la tabla, como los gráficos, permiten ordenar la información y generar algo similar al ranking de riesgo específico de Chile (SERNAGEOMIN), pero a nivel local.

Es posible realizar también gráficos para cada entidad ordenando los datos en orden de mayor a menor grado de amenaza absoluta. Estos gráficos presentan una información más certera que la amenaza promedio y comunicarían mejor la incertidumbre.

Por ejemplo, el gráfico de amenaza de Pucón (Fig. 5.25) presenta amenaza máxima de 439, al menos un 67,87% de Pucón presenta algún grado de amenaza y su amenaza mínima es de 60. El gráfico es escalonado, donde es posible identificar cinco subniveles de amenaza dentro de Pucón, de mayor a menor: (1) centro de Pucón, (2) suburbios de Pucón, (3) sector camino a Quellhue (antes del Aeródromo), (4) camino al Volcán, (5) Caminos a Península y sectores baldíos, (6) La Península y sectores baldíos. Además, es posible observar que, desde un punto de nula amenaza, abruptamente cambia a niveles de amenaza más intermedios, aumentado su amenaza, primero, gradualmente hasta que empieza a aumentar exponencialmente en sus niveles más altos. Implica que existen algunos sitios focalizados con una extrema amenaza, estando éstas en el centro de Pucón.

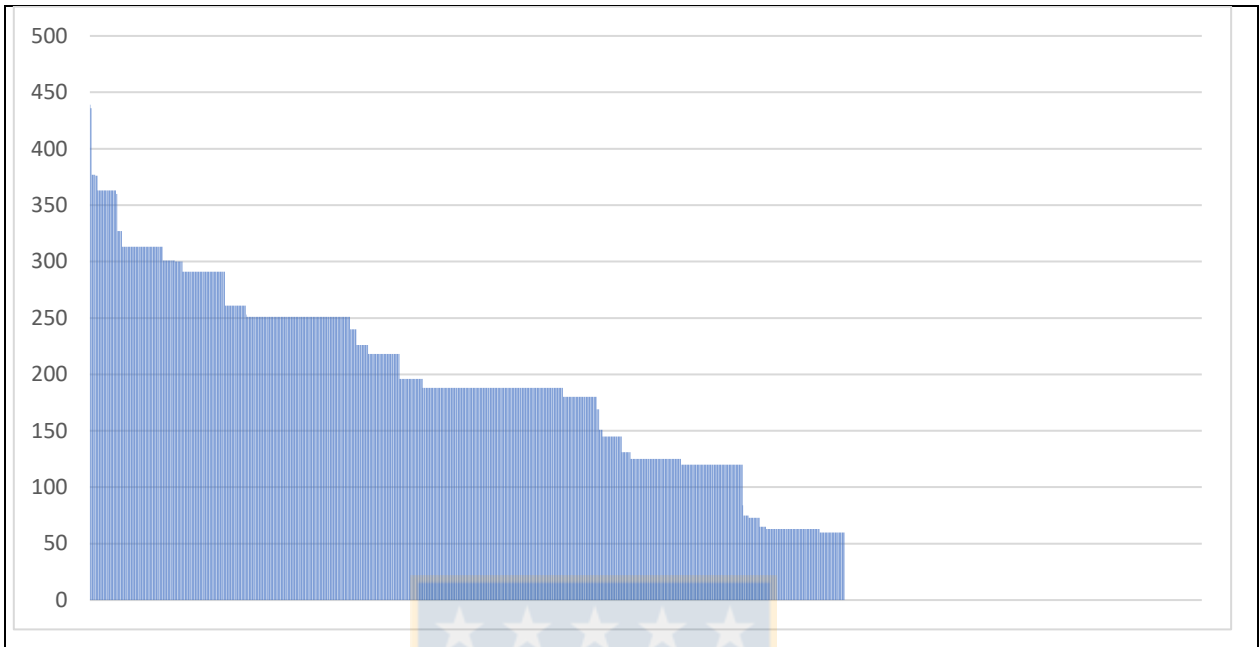


Figura 5.25: Gráfico de amenaza de Pucón. Se organiza de mayor a menor la amenaza de Pucón. Elaboración propia.

5.5.4. Análisis de Riesgo Volcánico

Además de las indicaciones y ejemplo de utilización de los resultados que están descritos en el subcapítulo 5.1.10., los resultados obtenidos del análisis de amenaza pueden ser utilizados para futuros análisis de riesgo volcánico. El censo 2017 contiene información acerca del sexo, la edad, origen y situación de la vivienda de los habitantes; el tipo de muro, techo y piso; y además información acerca de la recuperabilidad de los materiales y obtención de agua de las viviendas. Esta información está distribuida por manzanas y entidades censales, cuyos datos se resumen a continuación (Tabla 5.5) y pueden integrarse directamente con los valores de amenaza promedio por entidad. Además, algunas rutas de la base de datos de este trabajo también poseen una categoría según si son pavimentadas, de ripio o tierra. Todas estas variables, sumado a *curvas de vulnerabilidad*, pueden ser utilizadas para realizar un análisis de vulnerabilidad, cuyos resultados pueden operarse con los grados de amenaza posibilitando una evaluación de riesgo volcánico.

Tabla 5.5: Compendio de resultados del censo 2017. Los valores presentados son la suma de todas las entidades dentro del área establecida en el subcapítulo 5.3.1 dividido por comuna. Obtenido del censo 2017, INE.

	Pucón	Villarrica	Panguipulli	Curarrehue
Habitantes totales	27.712	50.593	8.963	2.141
Hombres	13.581	24.555	4.568	1.108
Mujeres	13.932	25.735	4.386	1.023
Personas de 0 a 5 años	1.814	3.146	375	160
Personas de 6 a 14 años	3.022	5.471	862	278
Personas de 15 a 64 años	18.655	33.480	5.740	1.188
Personas mayores a 64 años	2.548	5.155	989	261
Emigrantes	773	532	29	41
Perteneciente a Pueblo originario	7.718	13.248	5.871	1.309
Viviendas particulares	16.957	25.938	5.480	1.044
Viviendas colectivas	112	73	7	2
Viviendas con ocupante presente	9.104	16.661	3.059	711
Viviendas totales	17.069	26.011	5.487	1.046
Viviendas con pared de hormigón armado	377	909	93	6
Viviendas con pared de albañilería	492	1.451	39	13
Viviendas con pared de tabique forrado	6.677	11.726	2.278	550
Viviendas con pared de tabique sin forro	1.366	2.125	543	107
Viviendas con pared de adobe	28	40	6	3
Viviendas con pared de material precario	127	334	79	29
Viviendas con techo de tejas	893	1.453	188	19
Viviendas con techo de losa y hormigón	68	86	1	1
Viviendas con techo de planchas	8.032	14.878	2.799	677
Viviendas con techo de fonolita	12	24	7	1
Viviendas con techo de paja	4	5	0	0
Viviendas con techo de material precario	40	100	36	6
Viviendas con techo sin cubierta sólida	3	33	11	0
Viviendas con piso parqué y flotante	8.070	14.921	2.724	649
Viviendas con piso radier	220	300	98	21
Viviendas con piso de baldosa	597	1.138	142	21
Viviendas con piso de capa de cemento	131	179	55	14
Viviendas con piso de tierra	13	21	16	1
Viviendas con material aceptable	6.700	12.631	2.164	525
Viviendas con material recuperable	2.126	3.423	737	144
Viviendas con material irrecuperable	165	442	120	33

Tabla 5.5 (continuación): Compendio de resultados del censo 2017.

	Pucón	Villarrica	Panguipulli	Curarrehue
Viviendas con agua de red pública	6.188	12.230	840	194
Viviendas con agua de pozo noria	756	2.006	398	13
Viviendas con agua de camiones o aljibe	219	83	34	6
Viviendas con agua obtenida de vertientes	1.876	2.239	1.753	492

Un análisis de riesgo puede proporcionar información para su utilización en aspectos más específicos, tanto de la planificación y gestión de emergencias, como de planificación territorial, puesto que puede proporcionar un marco para decidir sobre aspectos relacionados con los costos de mitigación y recuperación. Por ejemplo, determinando los posibles costos en pérdida de infraestructura.

5.6. Conclusiones

En este subcapítulo se responde al objetivo específico de este capítulo y las implicaciones en los resultados de exposición y amenaza, en su uso como herramienta de gestión y planificación de emergencias. Otras implicaciones acerca de su integración con las otras herramientas desarrolladas en este trabajo son tratados en el capítulo 7.

5.6.1. Análisis de Exposición

Del mapa del grado de exposición máxima (Fig. 5.16) se concluye que las zonas urbanas presentan los niveles más alto de exposición, como las ciudades de Pucón, Villarrica, el pueblo de Licán Ray y el balneario de Coñaripe, así como también los sectores aledaños a los caminos Villarrica-Pucón, Villarrica-Licán Ray y Licán Ray-Coñaripe. De los mapas de detalle (Anexo 3) se concluye que otros sectores más específicos también poseen un nivel alto de exposición, como los sectores de Aviación Sur, Candelaria, Catripulli, Colico, El Claro, El Parque, El Rehue, El Turbio, El Volcán, Loncotraro, Los Guindos, Molco, Palguín, Quelhue, Quetroleufu y Villa San Pedro.

De los gráficos de exposición máxima y mínima (Fig. 5.17-5.21) se concluye que Villarrica presenta una mayor área de al menos un grado de exposición (78,34%), seguido de Pucón (61,87%), Licán Ray (55,93%), Coñaripe (50,63%) y, finalmente, El Volcán (10,23%).

El bajo porcentaje en el sector El Volcán es debido, por un lado, a su enorme extensión donde la infraestructura se concentra en el valle del Zanjón Seco, específicamente alrededor de la ruta al volcán, siendo el resto cerros y bosques. Además, de que, al acercarse a las faldas del volcán, hay menos infraestructura por las restricciones de construcción del Parque Nacional Villarrica, el centro de esquí y otros sitios privados. En Pucón también incluye el sector de La Península y unas zonas baldías cerca de Los Álamos hacia el río Pucón, que representan un porcentaje sin grado de exposición, lo que afecta la amenaza promedio. Por otra parte, Villarrica presenta ningún grado de exposición en Los Carrales y parte de la costanera, sectores que no son tan grandes como en Pucón. Finalmente, Coñaripe y Licán Ray están situados entre zonas rurales, lo cual refleja también su considerable cantidad de áreas sin grado exposición.

Por otro lado, tanto Pucón, Licán Ray y Coñaripe presenta una tendencia similar en la evolución de sus gráficos, presentando una disminución con tendencia exponencial de la frecuencia acumulativa, en cambio, Villarrica presenta una disminución con tendencia logarítmica, esto quiere decir que Villarrica presenta una mayor frecuencia de sitios con grado de exposición intermedio. Los otros sectores presentan una cantidad porcentualmente mayor de sitios con alto grado de exposición. Esto refleja una mayor naturaleza turística en Pucón, Licán Ray y Coñaripe, en comparación a Villarrica.

5.6.2. Análisis de Amenaza

Del mapa de amenaza máxima del volcán Villarrica (Fig. 5.22) se concluye, en términos generales, que el mayor grado de amenaza se concentran en los centros urbanos de Pucón, Coñaripe y cerca de Licán Ray, debido mayormente a la alta exposición de esos sectores.

En los mapas de detalle (Anexo 4) se puede observar el estado de amenaza en que se encuentran actualmente las vías de evacuación y puntos de encuentro.

1) La vía de evacuación hacia Curva El Mirador está en una zona de amenaza moderada baja (100-135) en su extremo norte y moderada alta en su extremo sur (167-211), esto debido al alto impacto

que puede tener la ocurrencia de un flujo piroclástico, a pesar de que son de muy baja recurrencia. Por lo mismo, el camino entre centro de esquí y Juncalillo están ubicados en puntos de muy alta (262-331) a extrema amenaza (332-480). Esto debido, además, por la ocurrencia de proyectiles balísticos (también de muy baja recurrencia) y de lahares (mayor recurrencia) que potencialmente puede irse por quebrada que corta el camino entre ambos. Esta vía de evacuación también presenta dificultades desde la entrada del Parque Nacional Villarrica sector Rucapillán, puesto que para acceder a ésta se debe cruzar el Zanjón de La Maestranza, amenazada por lahares.

2) El punto de encuentro tras las cuevas volcánicas no presenta amenaza, sin embargo, para acceder a ella se debe cruzar el estero Nalcadero por caminos que son también de amenaza moderada baja, debido a un alto peligro de lahares, pero con un menor grado de exposición.

Respecto al punto 1 y 2, este sector presenta amenaza porque existen rutas y senderos que son usualmente transitados por muchos visitantes que suben a los centros turísticos. Además, desde la entrada al parque hacia el Camino Internacional también viven muchas personas. En el peor de los casos puede ocurrir dificultades de tránsito durante un escenario catastrófico. La recomendación más prudente es mantener la entrada al Parque Nacional Villarrica cerrado en caso de Alerta Naranja.

3) El río Turbio ha sido inundado frecuentemente por lahares, en un peor escenario podría llegar a impactar el puente Quelhue, por lo que las vías de evacuación se definen hacia la Escuela Quelhue, el cual tiene instalaciones para funcionar como albergue. Esta zona presenta, en general, moderada amenaza, en parte, porque es una zona rural habitada, y por el otro, tiene probabilidades de ocurrencia de caída de ceniza y flujos piroclásticos en caso de una erupción catastrófica, o los vientos sean desfavorables.

4) La amenaza, en general, moderada de Los Calabozos está determinada por la cantidad moderada de personas que viven el sector y por la ocurrencia (casi nada frecuente) de flujos piroclásticos en erupciones catastróficas o, también, debido a emisiones de flujos lavas por alguna hipotética abertura de fisura hacia el flanco N del volcán.

5) Pucón presenta una amenaza de alta a extremadamente alta debido principalmente a su alta exposición, puesto que los peligros volcánicos que alcanzan la ciudad son muy poco frecuentes, como la caída de tefra y flujos piroclásticos. Pero, lahares con alcance de impacto distal pueden ocurrir más frecuentemente e inundar parte de la ciudad (erupción 1971). Las vías de evacuación

están todas sobre alta amenaza, aunque el punto de encuentro de La Península está ubicado en una zona de amenaza moderada baja. Por la cantidad de personas que habitan la ciudad y las vías cortas, la recomendación es no usar vehículos para evacuar.

6) y 7) Tanto las vías de evacuación en el sector de Candelaria, como Los Riscos están en zonas de baja amenaza. Estas zonas son rurales, y además, presentan una menor amenaza por fenómenos volcánicos que son muy poco frecuentes en el sector, como flujos de lavas y piroclásticos.

8) Coñaripe presenta alta a extremadamente alta amenaza, de hecho, históricamente ha sido destruido por ocurrencia de lahares y flujos de lava (erupciones de 1963-64 y 1971). La vía de evacuación hacia el Mirador Ñisoleufu no presenta amenaza. Sin embargo, solo es útil para las personas que viven en el centro del balneario. Actualmente no está establecido un plan para quienes viven en Coñaripe Alto y San José, cuyo camino hacia Coñaripe centro puede ser cortado por ocurrencia de lahares en el estero Diuco.

9) Licán Ray no presenta amenaza, tanto las vías de evacuación hacia Villarrica y Panguipulli son seguras. Sin embargo, la ruta entre Licán Ray y Coñaripe presenta amenaza.

10) y 11) Tanto el sector Pino Huacho, como el sector Chaillupén, tienen una amenaza moderada a alta, debido a la ocurrencia de lahares y flujos de lava por el estero Chaillupén, a pesar de que son sectores de baja exposición. Tal como se establece en el plan, la vía de evacuación hacia cerro Cudico desde Pino Huacho tiene baja a nula amenaza, y en el sector Chaillupén la recomendación es dirigirse a sitios alto y evitar usar los caminos locales, puesto que potencialmente pueden ser inundados por los fenómenos volcánicos mencionados.

12) En el sector Huincacara, la ocurrencia de lahares por el río Voipir (erupción 1971) implica una amenaza moderada a alta, a pesar de su menor exposición. Tal como se establece en el plan de emergencia, las subidas al cerro Huincacara son una opción segura. Sin embargo, también los caminos a Villarrica no presentan ninguna amenaza (excepto la Ruta S-847).

13) y 14) En la ruta entre Villarrica y Pucón, la zona de amenaza empieza desde estero Carmelito y termina aproximadamente en estero Huichato, por lo que la vía de evacuación de la Segunda Faja es segura. Sin embargo, la que está definida para el Camino Internacional, presenta una alta amenaza entre los esteros Correntoso y Molco.

15) Por supuesto, las rutas de Villarrica hacia Freire y la Ruta 5 Sur no presentan amenaza.

Respecto al gráfico de amenaza promedio por comuna (Fig. 5.24) es posible observar algunas tendencias, como el aumento exponencial de la amenaza promedio de la comuna de Villarrica, la cual tiene una cantidad considerable de sitios con amenaza promedio nula (por ejemplo, la ciudad de Villarrica). Pero aquellas entidades que están amenazadas son altas, debido a la amenaza que presentan parte de los caminos de Villarrica a Pucón y Coñaripe por la ocurrencia de lahares en los valles que bajan hasta los lagos Villarrica y Calafquén. En cambio, la comuna Pucón tiene una evolución más progresiva con una gran cantidad de entidades amenazadas, aunque aumenta abruptamente hacia la izquierda del gráfico (representando la amenaza promedio de la ciudad de Pucón). La comuna de Coñaripe tiene la misma tendencia que Villarrica, pero a menor escala, con valores menores de amenaza promedio y cantidad de entidades amenazadas.



6. PELIGRO SIMPLIFICADO DEL VOLCÁN VILLARRICA

6.1. Estructuración

Se utiliza la estructuración formulada por Jorquera (2018), la cual garantiza la consistencia entre los resultados del análisis y el problema planteado. De este modo, se pretende facilitar la revisión y utilización de la metodología y los resultados del análisis para expertos y tomadores de decisiones al consultar este material.

6.1.1. Definición del Problema

Las necesidades que pueden tener los usuarios no especializados, como la comunidad, respecto a la ocurrencia de peligros volcánicos en el sector donde viven o visitan, son tener conocimientos acerca de: cuál es la naturaleza de los fenómenos volcánicos, qué lugares pueden alcanzar, qué tan frecuentes son, cómo pueden afectar a su salud y pertenencias, y cuáles son los planes oficiales de respuesta ante emergencias.

Una herramienta potente frecuentemente usada para comunicar a los usuarios acerca de los peligros volcánicos y zonas de seguridad son los mapas de peligro. Actualmente, el Mapa de Peligros del Volcán Villarrica (Fig. 6.1) publicado por SERNAGEOMIN (Moreno, 2000) es accesible a todo público y es el mapa oficial disponible y difundido, tanto para expertos, como para usuarios no especializados, incluido la comunidad. También son públicos otros productos más recientes, como: el plano de evacuación confeccionado por la ONEMI, que replica y simplifica el mapa del SERNAGEOMIN y agrega puntos de encuentro; y un mapa satelital que contiene solo información de puntos de encuentro (Anexo 8). Ambos mapas muestran en gran escala todo el sector de afectación.

Uno de los problemas es que no se tiene acceso a un informe que explique detalladamente la metodología de confección del mapa de peligro del SERNAGEOMIN. Esto dificulta a los usuarios su correcta utilización como herramienta de comunicación. Además, no se ha realizado ningún estudio que evalúe empíricamente la usabilidad del mapa del SERNAGEOMIN para comprobar su efectividad, ni se ha estudiado formalmente la percepción de los usuarios respecto al mapa. También, los mapas más recientes (Anexo 8) no presentan una escala adecuada para los visitantes que no conocen las rutas, ni las localidades.

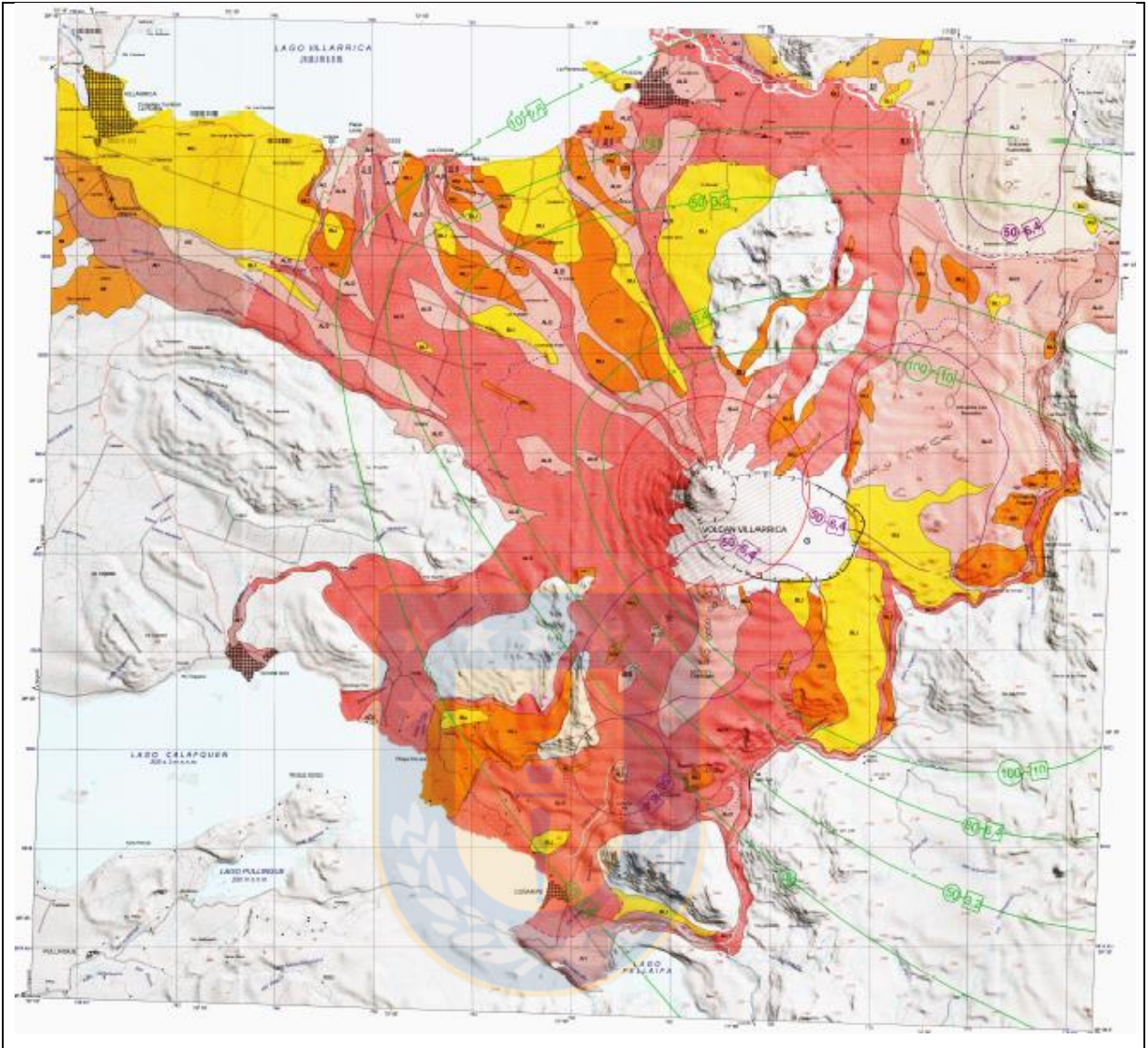


Figura 6.1: Mapa de peligro del volcán Villarrica SERNAGEOMIN. Los colores rojos, naranja y amarillos representan la integración de los peligros de lavas y lahares (etiquetas AL1, A11, AL12, A12, ML1, MI, BL1, y AL3). Las líneas verdes y moradas representan el espesor de acumulación de caída de tefra y tamaño de clastos del cráter principal y adventicios, respectivamente. El patrón rojo representa la caída de piroclastos balísticos. Elaborado por Moreno (2000).

A priori, según lo establecido en el subcapítulo 2.4.1, el mapa del SERNAGEOMIN no presenta un diseño adecuado para comunicar peligros, ni presenta toda la información relevante para la comunidad. Algunas de las observaciones acerca de estos puntos son las siguientes: (1) la elección de colores no presenta suficiente claridad, por ejemplo, las zonas AL1 y AL12 tienen el mismo color y representan áreas con significados diferentes y, AL3, presenta un color muy similar al

blanco. (2) La definición de las zonas de peligro y sus descripciones son complejas. Las zonas fueron definidas a partir de una combinación de criterios como: la magnitud, el tiempo de ocurrencia, la fuente de origen y la temporada del año. De esto se desconoce cómo se integraron los criterios entre sí, y a veces se traslapan, como el tiempo de ocurrencia en AL2 y MLI. (3) Existen dos escalas secuenciales de colores para un mismo fenómeno volcánico, una escala de intensidad del rojo y otra de tonos rojo-amarillo-naranja. Esto puede confundir la comunicación de la magnitud de los peligros. Por ejemplo, ¿qué es menos peligroso el rojo blanquecino o el amarillo? (4) La escala del mapa podría no ser la adecuada para comunicar con detalle los peligros para su utilización en confección de rutas de evacuación. (5) La topografía no es suficientemente detallada para facilitar una correcta localización en el mapa y los gráficos son demasiado complejos. Esto puede dificultar la interpretación de los peligros. Por ejemplo, ¿es más peligroso una zona naranja bajo una curva verde o una zona roja bajo una curva morada? (6) El uso de mapas 2D presenta algunas desventajas, como comunicar mal cómo se integran los peligros con la topografía. (7) Los elementos que presentan mayor saliencia visual en este mapa son los peligros, lo cual no permite visualizar bien rutas y sitios claves para la localización.

Entonces, con el propósito de avanzar sobre la problemática de comunicar con efectividad los peligros y zonas de seguridad a la comunidad, en este trabajo se elabora un mapa de peligro simplificado con las consideraciones descritas en el subcapítulo 2.4, evaluando su usabilidad empíricamente utilizando la tecnología de seguimiento ocular y su influencia en la percepción de los usuarios.

6.1.2. Objetivos y Utilización

La confección de un mapa de peligro simplificado del volcán Villarrica tiene como objetivo comunicar acerca de: los peligros asociados a los principales fenómenos volcánicos del volcán Villarrica (subcapítulo 6.2.2), qué hacer en caso de una emergencia y cuales son los actuales planes de emergencia (subcapítulo 6.2.4). Esto para incidir en la percepción de riesgo de la comunidad que vive o visita el volcán y, de este modo, facilitar la gestión de los planes de emergencias establecidos por las organizaciones correspondientes.

La utilización de este material es orientada hacia la comunidad, por lo tanto, su uso es para informar cuáles son los puntos de encuentro y las rutas por donde deben escapar ante una emergencia

volcánica y, a la vez, comunicar porqué escapar a esos lugares determinados y no otros, de cómo podrían ser impactados por los fenómenos volcánicos y que decisiones tomar para prevenirlo.

Por otro lado, aunque no son los usuarios objetivos, los expertos podrían hacer uso de las recomendaciones respecto al diseño de mapas y la evaluación de éstos, para la confección de sus propios mapas de peligro simplificados de otros volcanes.

6.1.3. Peligros que Considerar

Los peligros considerados para su comunicación son las corrientes de densidad piroclásticas, flujos de lava, lahares, proyectiles balísticos y caída de tefra, cuyas definiciones y características pueden ser revisadas en el subcapítulo 2.2. Estos son los fenómenos volcánicos que ocurren (frecuentemente o no) en el volcán Villarrica y, por lo tanto, deben ser conocidos por los lugareños y visitantes.

6.1.4. Escenarios Eruptivos y Escala de Tiempo

Para la confección de este mapa se consideran eventos históricos del volcán Villarrica (capítulo 3 y subcapítulo 4.2). Por lo tanto, de los escenarios eruptivos establecidos para la evaluación de amenaza (subcapítulo 5.2.1) se seleccionan aquellos que tengan un valor 1 o 2 de ocurrencia <500 años, dato obtenido de la integración de peligros del volcán Villarrica (Tabla 5.2). En consecuencia, los escenarios que no se consideran en la simplificación del mapa son las zonas 2 y 3 de las corrientes de densidad piroclásticas, y las zonas 3 y 4 de proyectiles balísticos. De considerar estos escenarios aumentaría considerablemente el grado de peligrosidad de zonas que son consideradas de seguridad en los planes de emergencia, a pesar de su muy baja probabilidad de ocurrencia. Mostrar estos escenarios a la comunidad podría incidir negativamente en la confianza de la población hacia las autoridades en caso de evacuación. Sin embargo, es importante también comunicar, de algún modo, que todas las zonas presentan al menos un grado de peligrosidad. Por lo tanto, esto se señala la descripción del mapa, de modo de que la representación visual no cause una potencial indecisión en el usuario a seguir las indicaciones propuestas por los funcionarios de emergencias.

Para simplificar la lectura del mapa no se consideran tampoco las zonas 1, 5 y 6 de los flujos de lavas. La primera, porque es un escenario también que, aunque es posible que ocurra si se abren fisuras en el volcán, también es considerado como un escenario principalmente de ocurrencia prehistórica. La segunda y tercera, porque tienen una extensión muy acotada alrededor de los volcanes adventicios, los cuales no afectan sectores con exposición poblacional importante, solo afectarían a personas que recorren el sendero El Volcán hacia el SE y NE.

6.1.5. Escala y Resolución Espacial

Las recomendaciones para la confección del diseño del mapa son posible replicarlos en cualquier sector alrededor del Volcán Villarrica y a cualquier escala. Particularmente, se elabora un mapa 3D que presenta una exageración vertical de 1,1 y una resolución de 1.920 x 1.080 con 72 dpi, lo cual que permite tener una visión de los peligros volcánicos desde la entrada al Parque Nacional Villarrica sector Rucapillán, hasta la cumbre del volcán.

Aquellos fenómenos que dependen de la topografía son evaluados con un modelo de elevación digital de 12,5 m de resolución. Los elementos vulnerables son localizados en el mapa con puntos geográficos establecidos sobre un mapa satelital del *Google Earth* con resolución de 25 x 30 cm.

6.1.6. Elementos Vulnerables

Se incluyen la localización de las vías de evacuación y puntos de encuentro, de puentes, escuelas, centros de salud, municipalidades, bomberos, servicentros y lugares de interés turísticos como termas, plazas, etc. Los detalles de los elementos pueden ser consultados en el subcapítulo 6.2.3. Los elementos vulnerables son mostrados para facilitar al usuario la localización geográfica en el mapa, así como para alertar acerca de sitios mayormente vulnerables.

6.1.7. Metodología

La metodología debe garantizar la confección de un buen producto comunicacional, por lo tanto, se tienen en cuenta, tanto la influencia de los diseños de los mapas, así como las características intrínsecas de los usuarios, en la influencia de cómo son leído e interpretados los mapas.

Respecto al primer factor, considerando investigaciones anteriores (subcapítulo 2.4.1), se escogen cuidadosamente las características preatentivas y simbólicas que pueden fomentar una idea precisa y compensar la falta de conocimiento acerca de los elementos mostrados. Se confecciona un mapa siguiendo un diseño orientado a la atención, el cual puede mejorar el rendimiento del mapa (Swienty *et al.*, 2008), mediante los criterios de simplicidad, jerarquía visual y concisión. Todo esto para garantizar: la utilidad, es decir, la relevancia de la información geográfica presentada; y la usabilidad, es decir, una visualización eficaz y eficiente de los elementos del mapa simplificado.

Se confecciona un único mapa simplificado para evaluar su usabilidad en terreno, sin perjuicio de que todos los criterios utilizados para el diseño del mapa simplificado pueden ser utilizados para su replicación en cualquier sector alrededor del volcán.

Para comprobar la usabilidad del mapa de peligro simplificado se realiza un estudio de usabilidad incorporando tecnología de seguimiento ocular, propuesto por Duchowski (2017). Este consiste en el análisis de procesos cognitivos (número de fijaciones, duración de las fijaciones, etc.) y el análisis cualitativo de la satisfacción de los usuarios. Los resultados son analizados a través de la aceptación o rechazo de una hipótesis nula (y de su consecuente hipótesis alternativa) mediante el análisis de varianza y una posterior interpretación de los datos. Para garantizar un buen análisis se elabora un diseño experimental (subcapítulo 6.3.2): se describe la hipótesis, las variables dependientes e independientes, y especifican los enfoques del experimento; así como las características de los participantes, materiales y procedimientos. Los resultados de los experimentos tienen sentido solo si son referenciados, por lo que se comparan los resultados del diseño de este trabajo con el diseño del mapa de peligro del SERNAGEOMIN. Posiblemente ambos mapas tienen objetivos diferentes, pero son comparables en relación a su potencial comunicativo. El experimento es elaborado usando el programa OGAMA 5.0.1.

Respecto al segundo factor, se realiza un cuestionario de la percepción del riesgo, modificado de Calderón (2017), incorporando algunas consideraciones de Corwin (2016). También se elabora un cuestionario de satisfacción. Ambos son aplicados posterior al experimento de seguimiento ocular.

6.1.8. Formato de los Resultados

Mapa 3D de Peligro Volcánico del Parque Nacional Villarrica sector de Rucapillán con 1.920 x 1.080 de resolución (subcapítulo 6.3.2.1) elaborado a partir del diseño orientado a la atención.

Diagramas de satisfacción del usuario, duración promedio de fijaciones, proporción de tiempo, número de fijaciones y promedio de la longitud de las sacadas (subcapítulo 6.4.2); y mapas de atención visual (subcapítulo 6.5.6). Estos productos permiten evaluar empíricamente la usabilidad del mapa.

6.1.9. Limitaciones e Incertidumbres

Las limitaciones e incertidumbres asociados a la confección del mapa de peligro simplificado están relacionadas a la elección de los escenarios de peligros mostrados, a las incertidumbres intrínsecas y metodológicas en la elaboración de dichos modelos (subcapítulos 5.1.9 y 5.5.1), y a los criterios utilizados para su simplificación, es decir, de las elecciones mediante los criterios de simplicidad, jerarquía visual y concisión, los cuales son discutidos con mayor detalle en el subcapítulo 6.5.

También existen limitaciones e incertidumbre en la definición de los puntos de encuentro y vías de evacuación, los cuales dependen de la accesibilidad, de la cantidad de recursos disponibles y de la concentración y características de la población permanente y flotante en las zonas. Los planes de evacuación deben ser revisados constantemente, puesto que los conocimientos y características, tanto del peligro, como de la exposición pueden variar con el tiempo.

También se discute en el subcapítulo 6.5 las limitaciones e incertidumbres asociadas a al experimento de seguimiento ocular y el cuestionario de percepción y satisfacción para evaluar la usabilidad de los mapas.

6.1.10. Indicaciones y Ejemplos para la Utilización de Resultados

La comunidad, como lugareños o turistas, pueden hacer uso del mapa simplificado para tomar decisiones acerca de qué hacer durante una erupción volcánica. Primero, debe indentificar sitios relevantes como su hogar o alojamiento, lugar de trabajo o sitios que suele visitar, etc. Segundo, debe identificar qué rutas se utilizan normalmente para movilizarse de un punto a otro, y las condiciones de dichas rutas. Tercero, debe identificar las zonas de peligro potenciales que pueden impactar en los sitios y rutas identificados. Cuarto, debe identificar cuales de esas zonas son más o menos importantes en términos de los fenómenos volcánicos involucrados, sus frecuencias de ocurrencia y capacidad destructiva. Quinto, identificar las rutas de evacuación y puntos de

encuentro más adecuados en caso de emergencia. Finalmente, sexto, debe informarse de cualquier otra medida de prevención útil para protegerse así mismo de los efectos de los fenómenos volcánicos.

6.2. Diseño de Mapa Orientado a la Atención

El criterio de simplicidad busca reducir la complejidad del mapa seleccionando únicamente aquellos elementos que presentan información geográfica relevante para los usuarios. En este caso se seleccionan aquellos elementos que tienen como objeto facilitar al usuario la localización en el mapa y comuniquen apropiadamente los peligros y planes de emergencia. En este proceso se debe tener precaución de no eliminar la información relevante y esencial del mapa, de modo de no interferir en los objetivos del mapa. Luego, el criterio de jerarquía busca organizar y estructurar todos los elementos seleccionados en capas visuales (Tabla 6.1). En este trabajo se le da una mayor importancia a las vías de evacuación y puntos de encuentro, luego a los sitios y rutas para la localización, luego a los peligros volcánicos y, finalmente, a los elementos topográficos e infraestructura de fondo. Finalmente, el criterio de concisión busca destacar aquellos elementos que son más importantes con características que lo resalten (saliencia visual) sobre las de menor importancia. Experimentos de seguimiento ocular anteriores prueban que, efectivamente, la saliencia visual mejora el rendimiento en la lectura de los mapas (Swienty *et al.*, 2008; Hegarty *et al.*, 2010).

Tabla 6.1: Capas visuales para un diseño orientado a la atención. Los elementos que se escogen para utilizar en el mapa se organizan en capas visuales ordenadas de mayor a menor relevancia. En la tabla se añade una descripción de las unidades de percepción, la información que comunican y la simbología escogida (si corresponde).

Capa Visual		Unidad de Percepción	Información	Simbología
Capa de Emergencia	Puntos de encuentro	Punto discreto	Ubicación y nombre de sitios seguros donde dirigirse en caso de emergencia volcánica	Ícono 40 px. Resplandor externo verde. Opacidad 100%
	Vías de evacuación	Línea	Dirección de recorrido de las vías de evacuación	Flecha grosor 14 pt. color verde. Opacidad 100%

Tabla 6.1 (continuación): Capas visuales para un diseño orientado a la atención

Capa Visual		Unidad de Percepción	Información	Simbología
Capa de Localización	Sitios conocidos	Punto discreto	Ubicación y nombre de sitios de interés turísticos, servicios y puentes	Ícono 30 px. Opacidad 90%
	Localidades	Texto	Ubicación y nombre de localidades	No aplica
	Rutas Destacadas	Línea	Ubicación y nombre de vías pavimentadas, de ripio y senderos	Grosor 7 pt. Pavimento línea continua roja y borde blanco o verde. Ripio línea continua blanca o verde. Sendero línea discontinua blanca o verde. Opacidad 80%
Capa de Peligros Volcánicos		Polígono	Ubicación de zonas de flujos de lava, lahares, caída de tefra, proyectiles balísticos y corrientes de densidad piroclástica, y sus grados de peligrosidad	Coropletas con esquema de color secuencial y sólido. Opacidad 40%
Capa de Base	Infraestructura de fondo	Línea y Punto	Ubicación de edificios y rutas accesorias	Línea continua y cuadrado gris. Grosor 4 pt. Opacidad 100%
	Hidrografía	Polígono y línea	Ubicación y nombre de lagos y ríos	Polígono sólido y línea continua grosor 7 pt. celeste. Opacidad 80%
	Mapa Base	3D	Imagen satelital <i>Google Earth</i> (topografía, cuerpos de agua, suelos, rocas, vegetación e infraestructura)	Opacidad 80%

En los subcapítulos siguientes se describe y justifica con mayor detalle las características escogidas para cada capa y sus representaciones visuales.

6.2.1. Capa de Base

El objetivo de la Capa de Base es comunicar la localización geográfica de los usuarios en el mapa. Se utiliza como mapa base una imagen satelital de *Google Earth* de alta resolución (octubre de 2019) (Fig. 6.2) con vista al Zanjón Seco, usado, particularmente, para los propósitos de este trabajo.

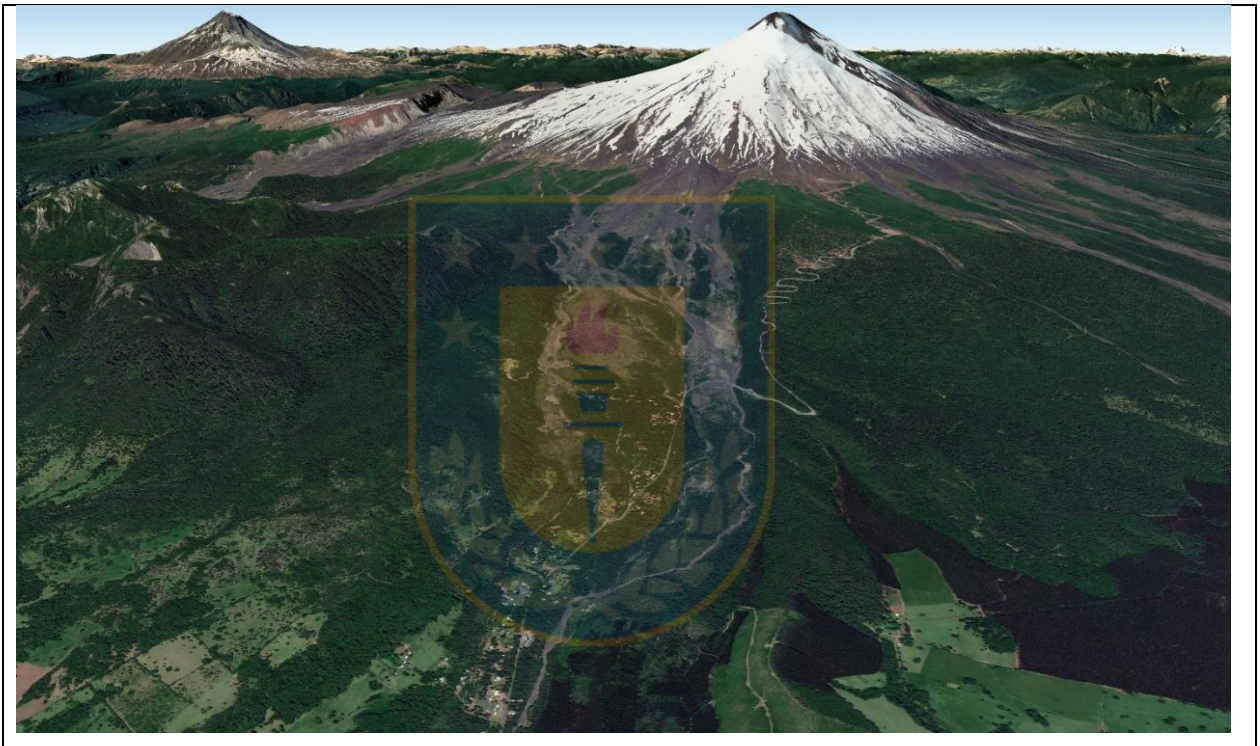


Figura 6.2: Imagen satelital de la entrada del Parque Nacional Villarrica sector Rucapillán. Tiene una proyección progresiva en 3D. Obtenido de *Google Earth Pro*.

A pesar de que esta unidad de percepción presenta contenido detallado y complejo, puesto que representa muchos elementos de diferente naturaleza (cuerpos de agua, suelos, rocas, vegetación, infraestructura, etc.) de manera muy precisa, los estudios anteriores han demostrado que mapas concisos y de topografía precisa son herramientas efectivas para la localización (Nave *et al.*, 2010), y, además, las representaciones que presentan información con mayor precisión son las imágenes reales del terreno, por ejemplo, fotografías aéreas (Haynes *et al.*, 2007).

Una manera de simular una fotografía aérea es utilizar una imagen satelital sobre una proyección progresiva en 3D, la cual permite visualizar mejor la información de los sitios bajos, mostrando una perspectiva similar a como percibe el ojo humano en un sobrevuelo de avión (Jenny *et al.*, 2010). Aunque con limitaciones, el programa *Google Earth Pro* permite visualizar las imágenes satelitales en una superficie con proyección progresiva y guardar imágenes en una resolución de 4.800 x 2.872 píxeles.

Se debe considerar que los mapas 3D no son tan efectivos para estimar distancias de un punto a otro y para localizar puntos concretos en comparación con su contraparte en 2D (Petrovic & Masera, 2006; Schobesberger & Patterson, 2008; Savage *et al.*, 2014), lo cual se compensa agregando otras capas visuales posteriormente. Pero los mapas 3D presentan ventajas en comunicar la altura y orientación de sus elementos, permite una mejor interpretación del terreno, los senderos y ambientes, e interpretación entre la relación de los peligros y la topografía (Petrovic & Masera, 2006; Preppernau & Jenny, 2015).

Los lagos y ríos son elementos que no son elementos demasiado visibles en las imágenes satelitales, porque la imagen suele ser demasiado oscura y, porque, además, son elementos muy delgados, como los ríos, son difícil de observar en grandes escalas. Por lo tanto, también se opta por agregar a la capa base los lagos y ríos geolocalizados (Fig. 6.3).

Los lagos y ríos son representados de color celeste (HEX: #00C3FF). Los ríos son representados con una línea de grosor 7 px. La elección de color busca representar el color del agua usado típicamente en mapas, los cuales permite una interpretación literal. Tanto los lagos, como los ríos fueron marcados por encima de una imagen satelital de *Google Earth* de alta resolución. Los nombres de ríos y lagos son etiquetados con fuente *Times New Roman* tamaño 20 o 15 pt., del mismo color celeste (#00C3FF).

También se añade una capa de infraestructura de fondo para resaltar la infraestructura en el mapa, como los edificios y rutas accesorias. Estos elementos proporcionan información con detalle de la ubicación o la densidad de infraestructura, la cual puede facilitar la localización. Esta información es obtenida de base de datos geolocalizados de infraestructura de edificios (Fig. 5.9) y de rutas (Fig. 5.14).

La saliencia visual no debe ser relevante, puesto que es información bastante detallada y compleja, por lo tanto, se simboliza con líneas delgadas con grosor igual o menor a 3 px. y cuadrados de 5

px., ambos con color gris claro (HEX: # CCCCCC), según sean rutas o edificios, respectivamente. Por otra parte, la Capa de Base se configura con una opacidad del 80% para disminuir su saliencia visual, pero de modo que aún puedan distinguirse entre los detalles de la imagen satelital.

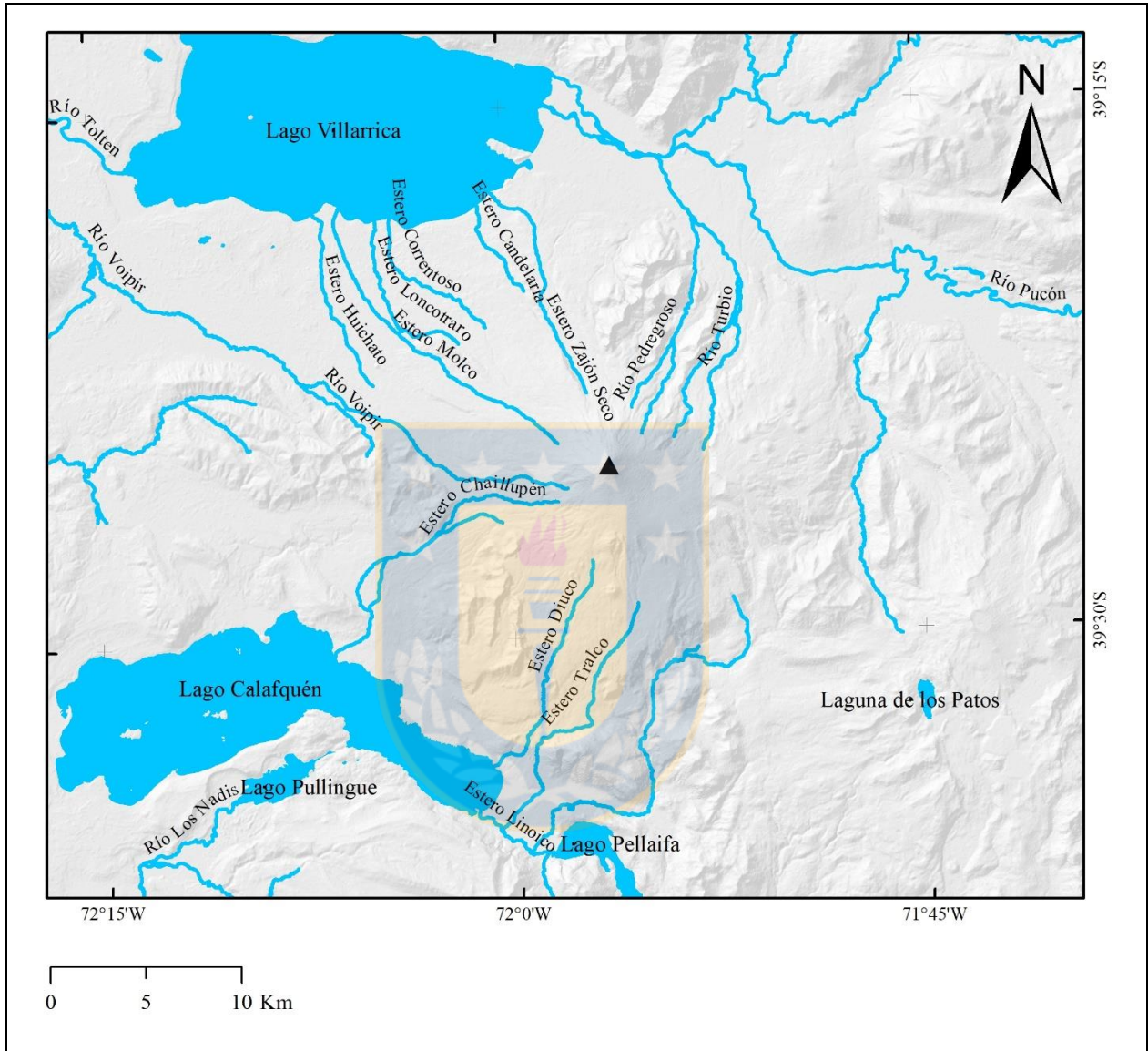


Figura 6.3: Mapa de lagos y ríos aledaños al volcán Villarrica. En polígonos y líneas celeste son representados los cuerpos de agua. El triángulo negro representa el cráter. Elaboración propia.

Finalmente, en la práctica, en el mapa simplificado del Parque Nacional Villarrica sector Rucapillán no se muestran la simbología de los ríos y esteros, solo sus etiquetas, puesto que este mapa se enfoca principalmente en el Zanjón Seco y mostrar el símbolo resultaría redundante.

6.2.2. Capa de Peligros Volcánicos

El objetivo de la Capa de Peligros Volcánicos es comunicar la distribución y la magnitud de los potenciales peligros del volcán Villarrica. A continuación se realiza una simplificación, a través de la integración de los peligros, para obtener la menor cantidad de coropletas que, a su vez, conserven la información esencial de cada fenómeno volcánico.

Para la confección de las zonas de peligro se utilizan los escenarios de peligros (subcapítulo 6.1.4), agrupando las zonas 2, 3 y 4 de flujos de lava en una sola, y calculando el promedio del total de peligro de cada uno de estos escenarios, dando un valor de 60,8.

En la zona de impacto proximal definida en el subcapítulo 4.2.4, se agrupan la zona 1 de corrientes de densidad piroclástica, la zona 1 y 2 de proyectiles balísticos, la zona 1 de lahares y la zona 7 de flujos de lava. Se calcula su grado de peligrosidad considerando la suma del total de peligro de mayor valor que interseca con la zona proximal con la suma de las otras zonas multiplicadas por el factor 0,1 (incluido las zonas 2 y 3 de lahares y las lavas), resultando de un grado de peligro generalizado de 139,8. Se debe considerar que la zona proximal no comprende completamente la zona 1 de lahares y la zona 2 de proyectiles balísticos. Sin embargo, las áreas sin intersecar son despreciables, por lo tanto, integrarlas dentro no afecta en los objetivos del mapa.

Luego, se integran y calcula la peligrosidad de las zonas de flujo de lava y lahares que quedaron fuera de la zona proximal. Esto resulta en una zona de flujo de lava con valor de 60,8 y en dos zonas de lahares con valores de peligrosidad de 75,7 y 64,0. También se calcula el total de peligro de la integración de todas las lavas (90,1) y de todos los lahares (88,0).

De este modo se clasifican los escenarios de peligro de flujos de lava en de alto peligro (90,1) y de bajo peligro (60,8). Así mismo se clasifican los escenarios de peligro de lahares en de alto peligro (88,0), de moderado peligro (75,7) y de bajo peligro (64,0). Los escenarios de peligro de corrientes de densidad piroclástica (117,0) y de proyectiles balísticos integrados (98,6) son los únicos escenarios representados, por lo que no necesitan distinguirse de otro escenario de su mismo tipo, debido a esto no reciben una clasificación..

Como se puede inferir, estas clasificaciones son para comparar internamente cada fenómeno volcánico y son nominadas de esa manera para facilitar la comunicación a los usuarios no especializados. El usuario puede saber de ese modo que no todos los escenarios y, por consecuente, extensiones de éstos, tienen la misma peligrosidad.

El peligro de caída de tefra también es también clasificada, aunque no sea representado visualmente en el mapa. En este caso, se distingue define que la caída de tefra dentro de la zona proximal es de alto peligro y fuera es de bajo peligro. El peligro de caída de tefra se describe en la leyenda expresando que todo el área del mapa es susceptible a ser impactado, a pesar de que el modelo de Arias (2020) calcula la probabilidad de ocurrencia de un espesor determinado de caída de tefra y éstos predominantemente se dispersan hacia el E. Esto debido a que: (1) la comunidad que vive en sectores aledaños al volcán debe estar siempre preparada para prevenir los impactos de caída de tefra, por lo que si se informa que hay zonas que no son afectadas no es una buena estrategia comunicacional. (2) Se busca no sobrecargar el mapa de muchos elementos visuales con base en el criterio de simplicidad, por lo tanto no se utilizan isopletas o áreas con patrones para su representación. (3) El registro histórico muestra que tanto la ciudad de Pucón, como Coñaripe no están exentos de ser impactados por caída de tefra (consultar subcapítulo 4.1). Por lo tanto la descripción puesta en la leyenda es pausable y recomendable. Además, bajo el mismo criterio, en la leyenda se añade como información descriptiva las corrientes de densidad piroclástica prehistórica de hace 3.700 años AP (o de 13.900 años AP dependiendo del sector) como otro fenómeno que puede impactar en toda el área.

El resultado de todas las consideraciones anteriores son siete zonas nominadas en una escala de peligro *Muy Alto, Alto, Moderado Alto, Moderado Bajo, Bajo y Muy Bajo*, que representan el orden de mayor a menor del valor del total de peligro integrado por zona.

Finalmente, se realizan los cálculos de integración del mismo modo que las veces anteriores: sumando la zona del total de peligro de mayor valor con la multiplicación del factor 0,1 por sobre todas las otras zonas traslapadas. De todo lo anterior, se obtiene la zonificación de los peligros simplificados, los cuales son representados en un mapa (Fig. 6.4) y su respectiva leyenda (Tabla 6.2).

Los peligros volcánicos son representados por polígonos con coropletas, esta es la forma más común de representar la peligrosidad y extensión de fenómenos volcánicos. De este tipo de representación se espera que disminuya el tiempo de procesamiento cognitivo al distribuir la información resumida en grandes áreas, aumentando la eficiencia del su uso, pero disminuyendo su eficacia para transmitir información concreta. Sin embargo, esta menor eficacia es compensada por un mensaje fuerte, urgente y global de los peligros, los cuales tienen una mayor relevancia en

cuanto a la toma de decisiones y a las representaciones duraderas en la memoria del usuario (Severtson & Vatovec, 2012).

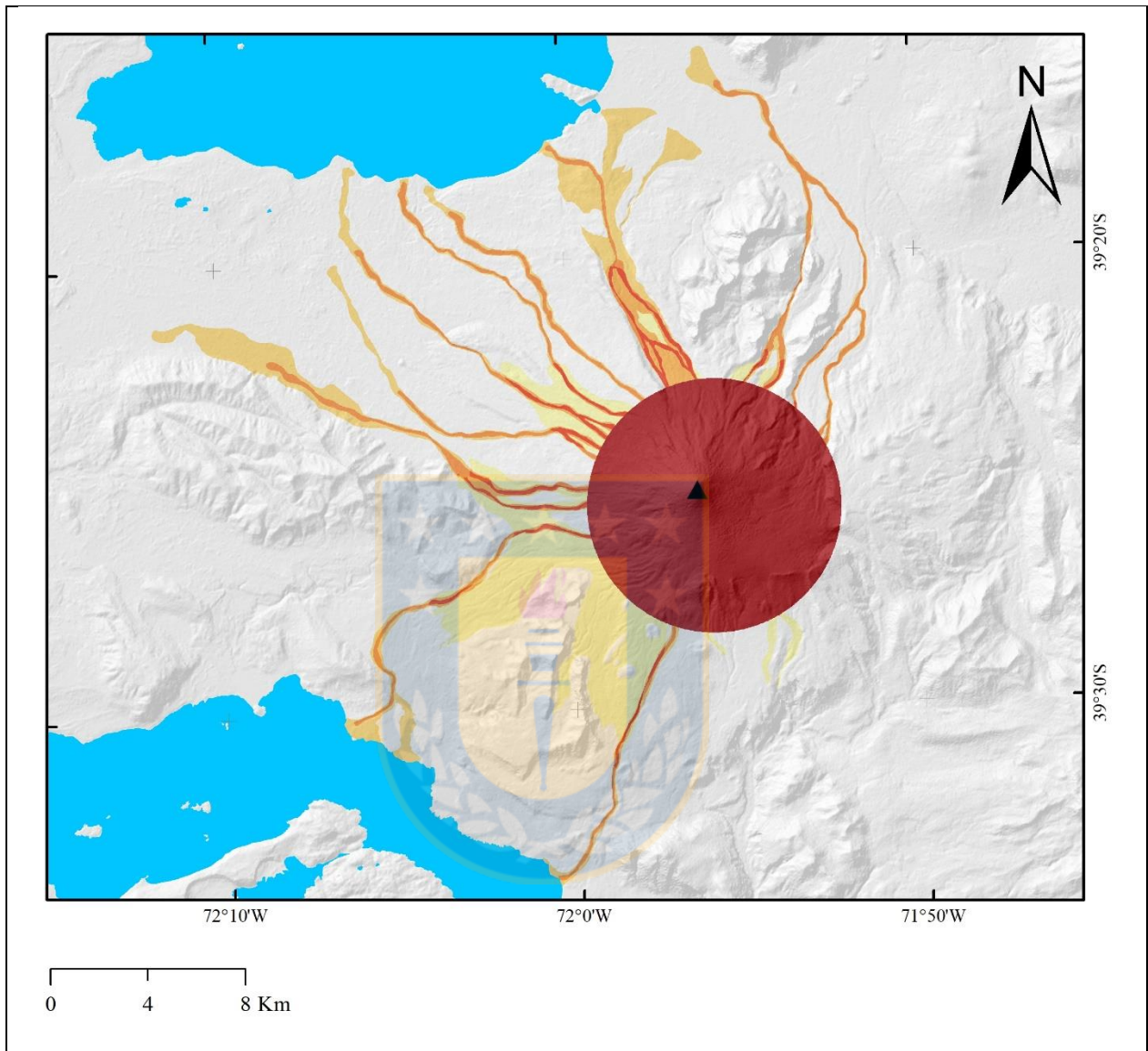


Figura 6.4: Mapa de peligro simplificado preliminar del volcán Villarrica. La leyenda es detallada en la Tabla 6.2. El cráter del volcán es representado en el triángulo negro. Modificado de Jorquera (2018), Álvarez (2020) y Arias (2020).

Por otro lado, se escoge un esquema de color secuencial con tonos de rojo-naranja y amarillo (Tabla 6.2) utilizando la herramienta *ColorBrewer* (Harrower *et al.*, 2003) para garantizar que los tonos sean correctamente interpretados también por personas con daltonismo. Tal como se ha revisado en investigaciones anteriores, la elección de estos tonos garantiza una interpretación correcta de la

magnitud de los peligros, así como una correcta comunicación de un mensaje global de advertencia y precaución, esto permite menor confusión en el uso del mapa y disminuye el tiempo y la necesidad de leer el texto de apoyo (Nave *et al.*, 2010; Severtson & Vatovec, 2012). También, el uso de amarillo como tono de menor peligro dentro de la escala garantiza que el usuario interprete esas zonas con algún grado de peligro presente, a diferencia del rojo con tonos blanquecino el cual puede ser confundido con blanco y, por lo tanto, con zonas con ningún peligro. Finalmente, se añade también una etiqueta en *Times New Roman* de tamaño 15 pt. color negro para identificar y permitir que el usuario identifique las zonas de peligro sin ambigüedades.

Tabla 6.2: Definición de zonas de peligro volcánico simplificado. Se representan las zonas según los valores del total de peligro integrado (considerando los promedios de las zonas agrupadas). Se agrega una columna con la escala de colores secuencial utilizado para el mapa y expresados en la codificación hexadecimal del color (HEX). También se añade la estimación de la frecuencia de cada peligro utilizando el árbol probabilístico (subcapítulo 4.4): ¹: Sector Pucón (5 de 100) y Sector Coñaripe (3 de 100). ²: Sector Pucón (6 de 10) y Sector Coñaripe (4 de 10). ³: PNV (8 de 100), Pucón (hace 2.500 años AP) y Coñaripe (5 de 100). ⁴: Sector Pucón (5 de 10) y Sector Coñaripe (2 de 10). ⁵: PNV (3 de 10), Pucón (5 de 100) y Coñaripe (4 de 100).

Nombre	HEX	Total Peligro Integrado	Zona de Peligro	Frecuencia
Zona Peligro Muy Alto	#a50f15	139,8	Peligro de corrientes de densidad piroclástica	¹
			Peligro de proyectiles balísticos	8 de 10
			Peligro alto de flujos de lava	3 de 10
			Peligro alto de lahares	²
			Peligro alto de caída de tefra	10 de 10
Zona Peligro Alto	#f03b20	81,8	Peligro bajo de flujos de lava	³
			Peligro moderado de lahares	⁴
Zona Peligro Moderado Alto	#fd8d3c	75,7	Peligro moderado de lahares	⁴
Zona Peligro Moderado	#feb24c	70,1	Peligro bajo de flujos de lava	³
			Peligro bajo de lahares	1 de 10
Zona Peligro Moderado Bajo	#fed976	64	Peligro bajo de lahares	1 de 10
Zona Peligro Bajo	#ffffb2	60,8	Peligro bajo de flujos de lava	³

Thompson *et al.* (2015) no recomienda el uso de expresiones como *alto*, *medio* y *bajo* para describir los peligros, puesto que resultan ambiguas. Por lo tanto, a estas expresiones se le añade a la descripción una expresión natural de la frecuencia (Tabla 6.2) obtenido del árbol probabilístico (subcapítulo 4.4). Esta expresión se estima redondeando el valor de probabilidad absoluta en una escala de 10, si la probabilidad es mayor a 10%, y en una escala de 100 si es menor a 10%. Por otro lado, se asigna la probabilidad correspondiente a la entrada al Parque Nacional Villarrica sector Rucapillán (PNV) considerando que está ubicado en la zona de impacto medio del sector Pucón, la ciudad de Pucón en la zona de impacto distal del sector Pucón y el pueblo de Coñaripe en la zona de impacto distal del sector Coñaripe. Esto para la asignación de su probabilidad para los peligros de caída de tefra y flujos de lava. En cambio, los peligros de lahares, proyectiles balísticos y corrientes de densidad piroclástica se asigna directamente las probabilidades de cada sector según si es de alto peligro (impacta zona proximal), moderado peligro (impacta zona media) y bajo peligro (impacta zona distal), si corresponde.

En el texto descriptivo expresiones como caída de tefra es cambiada a *caída de ceniza* y corrientes de densidad piroclásticas a *flujos piroclásticos* con el fin de facilitar la comunicación de estos fenómenos volcánicos, pensando que éstas son expresiones mayormente usadas, y son las que utiliza el SERNAGEOMIN para difundir acerca de estos peligros a la comunidad.

Finalmente, las zonas de peligro se colocan con una opacidad del 40% para permitir por un lado, la visualización de la Capa Base por debajo de ésta, y, por el otro, en la distinción correcta de los tonos rojos, naranjos y amarillos de las zonas de peligro.

6.2.3. Capa de Localización

El objetivo de la Capa de Localización es, como su nombre indica, facilitar la comunicación de la posición geográfica de los elementos que permiten la localización del usuario en el mapa. Como se ha mencionado anteriormente, la proyección del mapa 3D presenta desventaja sobre el mapa 2D para localizar lugares. Por lo tanto, para compensar esa desventaja se agregan sitios conocidos, localidades y rutas con una mayor saliencia visual que la Capa Base. A pesar de que se podría priorizar las características de saliencia de los peligros volcánicos debido a su importancia, se establece que si no existe una buena localización del mapa, la información de peligro puede resultar irrelevante. Por esto esta capa es ubicada jerárquicamente por encima de la Capa de Peligros.

Las rutas destacadas (Fig. 6.5) son obtenidas de la base de datos del Ministerio de Obras Pública (MOP), del 2017. Aunque durante el proceso de confección de los mapas se toma conocimiento de otras rutas o senderos que no están en ninguna de las bases de datos, los cuales son agregados posteriormente en la última fase de la elaboración del mapa simplificado.

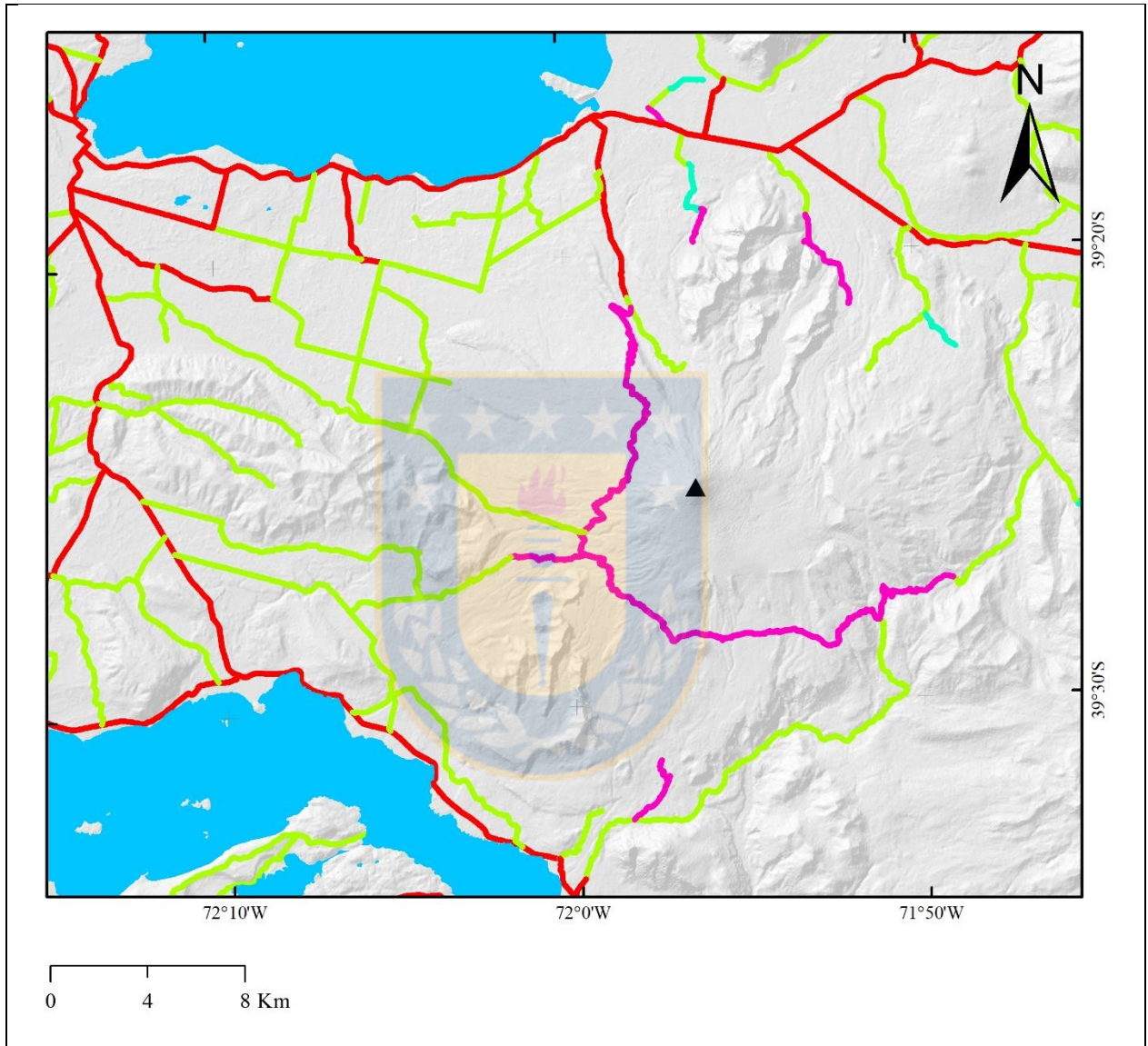


Figura 6.5: Mapa de rutas destacadas aledañas al volcán Villarrica. Camino pavimentado (rojo), de ripio (verde), de tierra (celeste) y sendero (rosado). Elaborado por la MOP, 2017.

También se agrega una base de datos geolocalizado de puentes (Fig. 6.6) elaborada con base en el censo 2017, el cual cuenta como elementos que representan sitios conocidos, aunque también permiten comunicar precaución siendo estos elementos de alta vulnerabilidad.

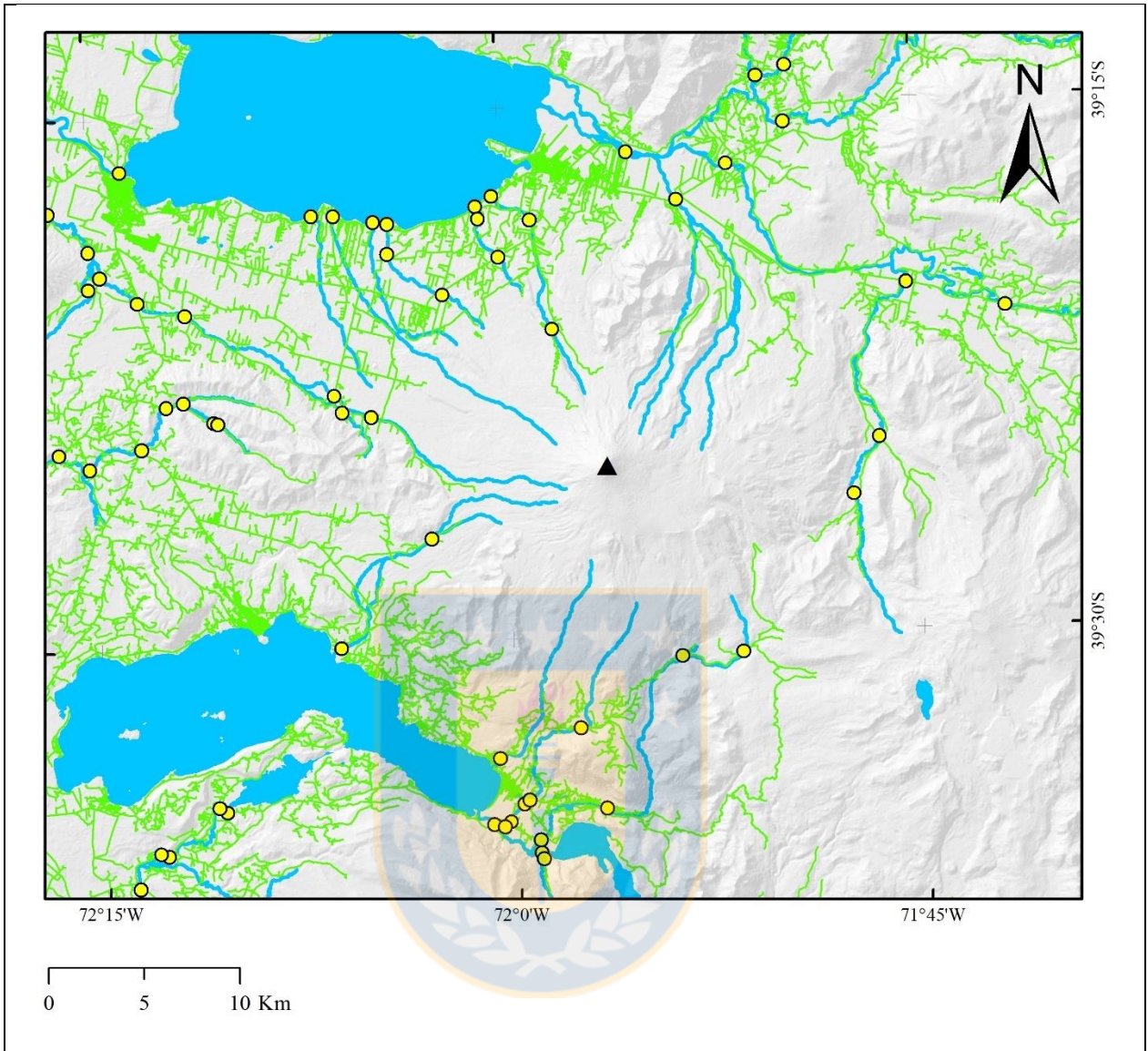


Figura 6.6: Mapa de puentes aledaños al volcán Villarrica. En puntos amarillos son representados los puentes. En línea azul se representan ríos y esteros. En líneas verde, rutas. Modificado del censo, 2017 elaborado por la INE.

La base de datos geolocalizado de los sitios conocidos puede consultarse en el subcapítulo 5.3.1.3 donde se muestran tanto los mapas de la infraestructura y sitios críticos de servicio, como los de turismo (Fig. 5.12-5.13). También se puede consultar los nombres y ubicaciones geográficas de la infraestructura y sitios críticos de servicio y turismo en la Tabla 5 y 6 *in* Anexo 2.

La ubicación y nombres de las localidades son obtenidos del Mapa de Peligro del Volcán Villarrica del SERNAGEOMIN (Moreno, 2000). El mapa fue previamente georreferenciado en *ArcGIS* 10.6.

para su utilización como base. También los nombres de localidades pueden ser revisados y utilizados de la base de datos de las entidades censales elaborado por el INE (Anexo 4).

Trabajos anteriores también han demostrado la relevancia que tienen las buenas representaciones simbólicas en los mapas para la efectividad de su uso (Petrovic & Masera, 2006; Haynes *et al*, 2007), puesto que símbolos fácilmente reconocibles por el usuario libera la carga de la memoria a corto plazo para usarse en otras tareas de uso del mapa (Severtson & Vatovec, 2012). En consecuencia, para la representación de los sitios conocidos y puentes se utilizan las señales de tránsito informativa y de advertencia utilizadas en Chile (Fig. 6.7) y para las rutas también se utiliza una simbología similar a la estandarizada por el Gobierno de Chile. En este caso se utiliza una línea continua para caminos de ripio, discontinua para senderos o caminos de tierra y línea con bordes para caminos pavimentados.



Figura 6.7: Simbología para sitios conocidos. Señales de tránsito informativa y de advertencia utilizado en las vías de Chile.

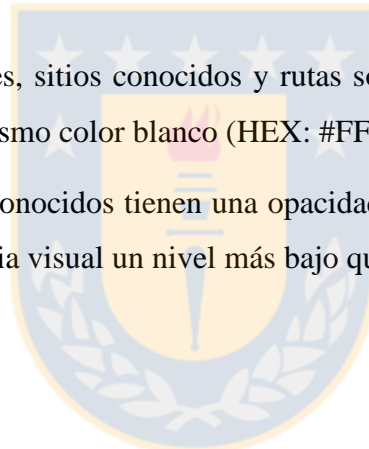
Los colores propios de las señales de tránsito también tienen niveles de saliencia visual, presentando las señales de advertencia, como los puentes y escuelas, una mayor saliencia por su color amarillo. Esto resulta conveniente para comunicar que estas ubicaciones presentan un nivel mayor de vulnerabilidad, puesto que los puentes son sitios críticos que usualmente son destruidos por la ocurrencia de lahares y las escuelas presenta mayores desafíos de evacuación en caso de

emergencia, debido a la concentración de una gran cantidad de personas menores de edad. Los centros de salud también son sitios vulnerables en caso de emergencia, siendo la cruz de color roja la característica con saliencia visual en este caso. También existen caminos que se cruzan con zonas de ocurrencia de lahares y no tienen puentes, como en los valles secos, estos puntos también son destacados con un símbolo de advertencia.

Los colores de las rutas son de color blanco o con borde blanco (HEX: #FFFFFF) puesto que resalta sobre la imagen satelital que tiene colores oscuros. Las rutas seguras o vías de evacuación definido en los planes de emergencia (subcapítulo 5.3.1.5) son representadas en color verde (HEX: #07FF00) con un tono recomendado por *ColorBrewer* (Harrower *et al.*, 2003). El color interno de las rutas pavimentadas es rojo (HEX: #ff0c0c), porque es el color estándar usado en los mapas cartográficos. Las rutas son representadas con líneas con un grosor de 7 px. y los íconos con un tamaño de 30 px.

Los nombres de las localidades, sitios conocidos y rutas son etiquetados con fuente *Times New Roman* tamaño 20 o 15, del mismo color blanco (HEX: #FFFFFF).

Finalmente, las rutas y sitios conocidos tienen una opacidad de 80% y 90%, respectivamente, de modo que presente una saliencia visual un nivel más bajo que la Capa de Emergencia.



6.2.4. Capa de Emergencia

La Capa de Emergencia tiene como objetivo comunicar los planes de emergencia de los sectores aledaños al volcán Villarrica. Esta capa incluye los puntos de encuentro (enfocado en los puntos transitorios) y las vías de evacuación de los planes de emergencia de la entrada del Parque Nacional Villarrica sector Rucapillán, de la comuna de Villarrica, Pucón y de la localidad de Coñaripe (subcapítulo 5.3.1.5).

Usando criterios similares a los descritos en la Capa de Localización se escoge la simbología para esta capa (Fig. 6.8), de modo de usar una simbología que transmita fácilmente su significado a partir de su representación visual. Por otro lado, las rutas seguras o vías de evacuación no dan detalle acerca de la dirección a seguir, por lo que se utiliza una flecha para comunicar la dirección a seguir ante una emergencia volcánica. A estas flechas se le añade una etiqueta con la distancia en kilómetros a recorrer en esa dirección entre el inicio y final de la flecha, para compensar el hecho

de que los mapas 3D no comunican bien las distancias. La simbología escogida para los puntos de encuentro es ampliamente utilizada en los planos y mapas de evacuación publicados en diferentes países, y mantiene una estética similar a la de las señales de tránsito.

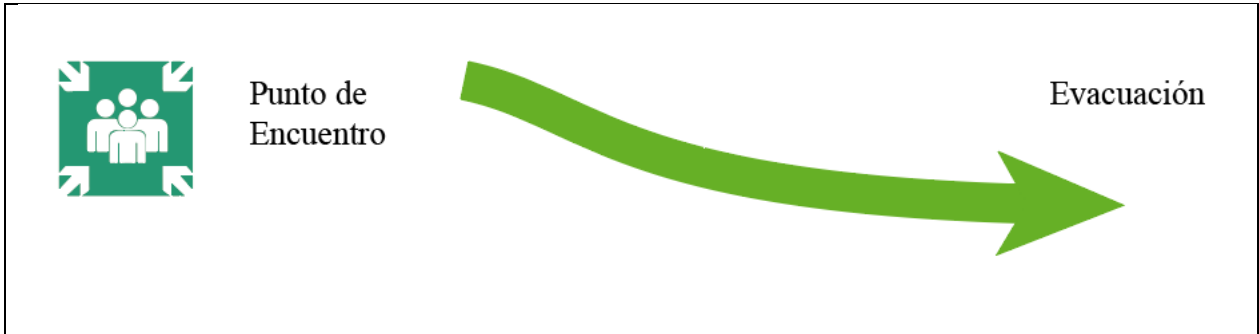


Figura 6.8: Simbología para puntos de encuentro y vías de evacuación. Elaboración propia.

El color de la simbología de puntos de encuentro es el mismo que las rutas seguras o vías de evacuación de la Capa de Localización (HEX: #07FF00). Las flechas presentan también un tono verde (HEX: #07ff00) que resalta por sobre los otros elementos. Es preciso mencionar que el color verde es ampliamente utilizado e interpretado como “seguridad” o “a salvo” en contexto de evacuación (Severtson & Vatovec, 2012).

Los nombres y distancias de esta capa también son etiquetados con fuente *Times New Roman* tamaño 25 o 20 pt., del mismo color blanco que las etiquetas de la Capa de Localización (HEX: #FFFFFF).

Finalmente, esta capa debe tener la mayor saliencia visual, por el criterio de concisión. Por lo tanto, estos elementos tienen una opacidad de 100%. Además, las flechas presentan el doble del grosor (14 px.) que otros elementos lineales y los puntos de encuentro presenta un tamaño de 40 px. (un poco más grande otros elementos icónicos) y se le añade un resplandor verde (HEX: #07ff00) para generar un mayor realce.

6.2.5. Leyenda e Informaciones

El mapa presenta el siguiente título *¿Dónde escaparías en caso de una Erupción Volcánica?*, lo cual es una declaración intencional y directa del objetivo del mapa, lo cual permite dirigir inmediatamente la atención del usuario en lo más relevante.

Se añade una leyenda (Fig. 6.9) con información acerca de los peligros volcánicos, donde queda expresado brevemente cómo fue definido la escala de colores de los peligros, qué fenómenos volcánicos están involucrados en cada zona y una descripción de su magnitud, tanto cualitativa (de bajo a muy alto), como cuantitativa (frecuencia natural). No todos los símbolos están descritos en la leyenda, debido al espacio limitado de ésta por la resolución de la pantalla utilizada en el experimento, y considerando que el tamaño de la letra no puede ser reducido demasiado para permitir su legibilidad por parte de personas con dificultades visuales.



Figura 6.9: Diseño de la leyenda del mapa de peligro simplificado del volcán Villarrica. Información que es presentada en el mapa de peligro simplificado de la entrada del Parque Nacional Villarrica sector Rucapillán. Elaboración propia.

En el cuadro de informaciones (Fig. 6.10) se añade una descripción muy breve de qué son cada fenómeno volcánico y sus características más relevantes, sus impactos y cómo prevenirlos.


Informaciones


Los **lahares** (mezcla de material volcánico y agua-nieve que cae por las laderas a gran velocidad 40 km/h) inundan valles y planicies, se extienden a kilómetros de distancia, destruyendo infraestructura y arrastrando enormes materiales, como edificaciones y automóviles.

Los **flujos de lava** (material volcánico fundido que cae lentamente por las laderas del volcán) destruyen todo a su paso, pueden contaminar aguas y generar vapores. La única precaución es mantenerse alejado.

La **caída de ceniza** (material volcánico principalmente de tamaño fino) puede causar problemas respiratorios y daños en los ojos. Una acumulación considerable de ceniza puede causar derrumbes de la infraestructura. Puede prevenir teniendo a mano mascarillas de seguridad y gafas de protección de alta exposición. Si se refugia dentro de un edificio tenga en cuenta el tipo de construcción y evite consumir agua de ríos, lagos y pozos durante un tiempo posterior a la erupción.

Los **proyectiles balísticos** (material volcánico en caída libre impulsado como un proyectil desde el volcán) y los **flujos piroclásticos** (mezcla de material volcánico y gases calientes que caen por las laderas a gran velocidad 100 km/h) ambos ocurren en la zona proximal, son letales y capaces de destruir infraestructura. La evacuación a tiempo es la única manera real de mantenerse a salvo de estos fenómenos, si se encuentra en la zona proximal mientras evacúa, mantenga su atención también arriba en el cielo por la caída de balísticos.

 **Evite los valles al menos que sea necesario y esté a tiempo de evacuar.**

 **Horario atención caseta invierno (8:30-18:00) y verano (7:00-19:00).
Teléfono Emergencia: 130.**


 **Áreas donde pueden posarse helicópteros posterior a los pasos de lahares y flujos piroclásticos: Curva el Mirador, Juncalillo, Cuevas Volcánicas y Centro de Esquí.**

Figura 6.10: Diseño del cuadro de informaciones del mapa de peligro simplificado del volcán Villarrica. Información que es presentada en el mapa de peligro simplificado de la entrada del Parque Nacional Villarrica sector Rucapillán. Elaboración propia.

Se usa una simbología de advertencia para comunicar la recomendación de alejarse de las topografías bajas por la ocurrencia de lahares, puesto que es importante resaltar esos sitios críticos

en el mapa. También se añade información relevante acerca de los planes de emergencia, en el caso del plan de emergencia de la entrada del Parque Nacional Villarrica sector Rucapillán se agrega información acerca del horario de atención de la oficina de la CONAF, el teléfono de emergencias e información acerca de los sitios identificados donde es posible aterrizar un helicóptero de rescate posterior a la emergencia, en caso de que personas queden aisladas en esos sitios.

Se utiliza un fondo color negro (HEX: #000000) con texto de color amarillo (HEX: #ffff00) como base y color rojo (HEX: #ff0000) para destacar los fenómenos volcánicos. Esta combinación de alto contraste permite una mejor visualización para personas con dificultad visual.

Todo el texto es escrito en *Times New Roman*, con títulos de tamaño 45 y 20 pt., subtítulos de 25 pt. y cuerpo del texto de 16 pt. Se utilizó el tamaño de letra más grande posible que permitiera una distribución apropiada de los elementos dentro de un espacio limitado.

6.3. Estudio de Usabilidad

6.3.1. Hipótesis

Tanto los diseños visuales de los mapas, como las características intrínsecas de los usuarios influyen en las mediciones de rendimiento y de procesos cognitivos. Por lo tanto, la *hipótesis alternativa* es que el mapa de peligro simplificado presente una mayor usabilidad que el mapa de peligro elaborado por el SERNAGEOMIN en un mismo grupo de personas con una misma percepción de riesgo. En contraposición, la *hipótesis nula* es que ni el diseño visual, ni las características intrínsecas de los usuarios influyen en la usabilidad de los mapas. La *usabilidad* es definida en este estudio como un conjunto de parámetros subjetivos, como la satisfacción (aprendizaje, utilidad y aficción) y, objetivos, como la complejidad, relevancia, y atención visual.

6.3.2. Diseño Experimental

6.3.2.1. Variables Independientes

El estudio consiste en una evaluación de la usabilidad de los mapas de peligro volcánico, cuyas variables independientes (Tabla 6.3) son una matriz 2 x 2 conformado por el diseño de los mapas de peligro del volcán Villarrica categorizado como *diseño propio* y *diseño del SERNAGEOMIN*; y

conformado por la percepción de riesgo del usuario categorizado en *alta* y *baja*, los cuales representan un valor obtenido de la diferencia entre el promedio de respuestas positivas de un individuo con la diferencia del promedio de todos los participantes, dividido por la desviación estándar de todos los participantes, esto por cada eje temático.

Tabla 6.3: Matriz de variables independientes del estudio de usabilidad. Se agrega una nomenclatura a las variables independientes de la matriz de 2 x 2.

	Percepción de Riesgo	
	Alta (A)	Baja (B)
Diseño propio (P)	P x A	P x B
Diseño del SERNAGEOMIN (G)	G x A	G x B

Los mapas evaluados en el experimento (Fig. 6.11-6.12) son una extracción del sector donde se aplica el estudio, es decir, la entrada del Parque Nacional Villarrica sector Rucapillán, oficina de la CONAF. El tamaño de los mapas es ajustado al 100% para representar cómo se vería si estuviese impreso en papel. El tamaño del mapa está determinado por los límites de un margen máximo de 1.920 x 1.080 pixeles, que es la resolución de la pantalla utilizada para este estudio.



Figura 6.11: Mapa simplificado de peligro volcánico de la entrada al Parque Nacional Villarrica sector Rucapillán. Nominado como diseño propio. Elaboración propia.

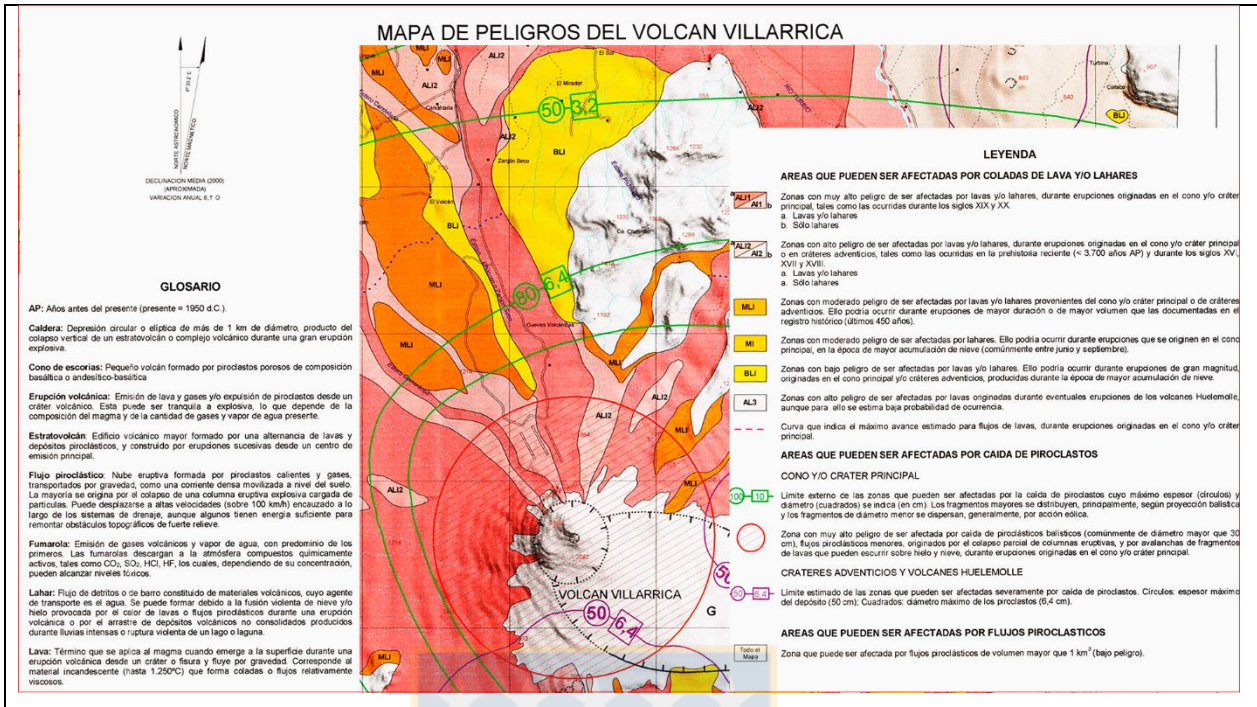


Figura 6.12: Extracción del mapa de peligro del SERNAGEOMIN entrada al Parque Nacional Villarrica sector Rucapillán. Modificado de Moreno (2000).

La percepción de riesgo es evaluada a través de preguntas categorizada en diferentes ejes temáticos (Tabla 6.4) (Calderón, 2017) con respuestas de opción binaria “sí” o “no” y, en algunas preguntas, se le agrega la opción “no sé”. La tabla muestra las preguntas realizadas a los participantes, incluyendo el porcentaje de respuestas positivas para la percepción de riesgo del total de participantes, según lo establecido en el subcapítulo 2.4.2.

Tabla 6.4: Preguntas del cuestionario de percepción de riesgo. Se categorizan según ejes temáticos y se añade la respuesta establecida como positiva para la percepción de riesgo y el porcentaje de respuestas positivas del total de participantes.

Eje temático	Pregunta	Respuesta positiva	% de respuesta positiva
Conocimiento en peligros volcánicos	¿Cree que el volcán Villarrica podría hacer erupción otra vez?	Sí	85,5
	¿Las erupciones pueden ser pronosticadas con exactitud?	No	54,5
	¿Los lahares son similares a los aluviones?	Sí	25,5
Conocimiento práctico	¿En caso de erupción del volcán Villarrica sabe cuál sería una zona segura dentro del Parque Nacional Villarrica?	Sí	30,9

Tabla 6.4 (continuación): Preguntas del cuestionario de percepción de riesgo.

Eje temático	Pregunta	Respuesta positiva	% de respuesta positiva
Conocimiento práctico	¿Conocía de antes el mapa de peligros del volcán Villarrica elaborado por SERNAGEOMIN?	Sí	18,2
	¿En caso de erupción es mejor acercarse a los ríos?	No	67,3
Experiencia previa	¿Ha sufrido los impactos de una erupción volcánica (en cualquier lugar)?	Sí	20,0
	¿Ha participado en alguna evacuación ante emergencia volcánica (en cualquier lugar)?	Sí	16,4
	¿Ha participado en algún taller, feria, charla o capacitación asociada a emergencias volcánicas?	Sí	16,4
Pericia	¿Su estudio o trabajo involucra el uso de mapas cartográficos?	Sí	30,9
	¿Su estudio o trabajo involucra conocimientos en volcanes?	Sí	25,5
	¿Su estudio o trabajo involucra conocimientos en seguridad y emergencias?	Sí	54,5
Conducta de prevención	¿Tiene un plan con su familia en caso de erupción?	Sí	27,3
	¿Tiene un contacto de emergencia en caso de una evacuación?	Sí	40,0
	¿Tiene implementos de seguridad para protegerse de la ceniza volcánica?	Sí	12,7
Confianza en las autoridades	¿Confía en las autoridades estatales y gubernamentales como la intendencia regional, la municipalidad de Pucón, carabineros, etc.?	Sí	78,2
	¿Confía en las autoridades técnicas como el SERNAGEOMIN y la ONEMI?	Sí	83,6
	¿Confía en organizaciones de seguridad privada como bomberos, seguridad civil, CONAF, etc.?	Sí	92,7
Ilusión de invulnerabilidad	¿En caso de erupción se verá afectado en este lugar?	Sí	72,7
	¿Las erupciones son comunes en el volcán Villarrica?	Sí	58,2
	¿Una erupción puede ser controlada?	No	83,6
Conducta de autoprotección	¿Se siente preparado para enfrentar una erupción?	No	56,4
	En caso de alarma de erupción y aviso de evacuación, ¿prefiere quedarse donde está a esperar qué ocurre?	No	74,5
	En caso de erupción, ¿se acercaría a la cumbre del volcán para observar lo que ocurre?	No	94,5

Tabla 6.4 (continuación): Preguntas del cuestionario de percepción de riesgo.

Eje temático	Pregunta	Respuesta positiva	% de respuesta positiva
Acciones para disminuir el riesgo	¿La capacidad de respuesta (coordinación entre municipio, ONEMI, SERNAGEOMIN, Carabineros, etc.) es suficiente para enfrentar una crisis actualmente?	No	43,6
	¿Considera adecuado que en los alrededores del volcán siga poblándose?	No	80,0

6.3.2.2. Variables Dependientes

Las variables dependientes para la interpretación de usabilidad de este estudio son:

1) *Satisfacción*, métrica subjetiva obtenida de un cuestionario de satisfacción (Tabla 6.5), el cual es cuantificado utilizando una escala de *Likert*, de muy en desacuerdo a muy de acuerdo. La satisfacción es evaluada en tres aspectos: *aprendizaje*, *utilidad* y *afección*, los cuales responden a las siguientes preguntas: ¿qué tan fácil es para el usuario interpretar el mapa? ¿Qué tan relevante para sí mismo es el mapa? ¿Qué tanto recomienda su uso a otras personas?

Tabla 6.5: Preguntas del cuestionario de satisfacción. Se categorizan en aprendizaje, utilidad y afección.

Categoría	Pregunta
Aprendizaje	El mapa es fácil de interpretar
	Las descripciones de la leyenda son fáciles de entender
	Las descripciones de la informaciones o glosario son fáciles de entender
	Logro localizarme bien en el mapa
Utilidad	Me parece útil el mapa para conocer acerca de los peligros volcánicos y sus extensiones
	Me parece útil el mapa para saber cuáles son las zonas de seguridad
	Me parece útil el mapa para saber qué hacer durante una erupción en el volcán Villarrica
Afección	Recomendaría a un familiar suyo usar este mapa de peligro volcánico

2) *Duración promedio de fijaciones* por región de interés (informaciones, título, leyenda vs. mapa): métrica de procesos que permite la interpretación de la complejidad o la relevancia de lo que se está mirando. Este parámetro no depende del tiempo ni del tamaño de la región, puesto que, aunque

el usuario pase más tiempo mirando o mire una región más grande, solo aumenta la cantidad de muestras las cuales se consideran para la estimación del promedio de duración.

3) *Proporción de tiempo* por región de interés (informaciones, título y leyenda vs. mapa): métrica objetiva que también permite la interpretación de la complejidad o la relevancia de lo que se está mirando. Este parámetro es la proporción entre el tiempo normalizado usado por el usuario mirando el área de interés y el tiempo total. Este parámetro es independiente del tamaño de la región, puesto que algo que es considerado útil o complejo tiene un mayor tiempo de uso, aunque sea una región más pequeña.

4) *Número de fijaciones* por región de interés (informaciones, título, leyenda vs. mapa): métrica de procesos que también permite la interpretación de la complejidad o la relevancia de lo que se está mirando. Este parámetro sí depende del tiempo y tamaño de la región, puesto que mientras mayor son el tiempo y el tamaño, naturalmente aumenta el número de fijaciones, por lo que este parámetro se divide por la proporción de tiempo normalizado usado por el usuario mirando la región y por la proporción del tamaño de la región de interés.

5) *Promedio de la longitud de las sacadas*: métrica de proceso que permite la interpretación de la eficiencia exploratoria del usuario. Este parámetro no depende del tiempo, ni del tamaño de la región.

6) *Mapa de atención visual del de total de fijaciones, de la primera y segunda fijación*: gráficos gaussianos que permiten interpretar directamente la saliencia visual del mapa, responde a preguntas como: ¿dónde el participante tiene su primer vistazo?, y, ¿qué elementos del mapa presentan mayores estímulos?

Los parámetros proporción de tiempo y el número de fijaciones son calculados de tal manera que que se puedan comparar los resultados de un participantes. Es decir, independiente de si un usuario pasó mucho o poco tiempo mirando un diseño, puesto que el tiempo total puede estar influenciado por varios factores, como su estado de tedio, el interés personal o habilidades cognitivas del participante. También, en que el número de fijaciones se pondera, también, según la región evaluada, puesto que de ese modo se descarta la posibilidad que un mismo usuario mirase más una región, solo porque fuese más grande que la otra.

6.3.2.3. Enfoque del Estudio

El estudio consiste en un *cuasiexperimento* el cual se realiza en *terreno*, lo cual aumenta su validez ecológica al pedir la participación de personas que están realizando sus propias actividades cotidianas. El estudio tiene un enfoque *nomotético*, es decir, se busca caracterizar los resultados de los diseños y las percepciones de riesgo basado en una población. También tiene un enfoque *muestral*, puesto que no se escogen las características específicas de los participantes, los cuales son encuestados aleatoriamente. El método utilizado es *entre sujetos*, esto significa que los diferentes diseños de los mapas son estudiados en grupos diferentes de personas. A pesar del riesgo a la homogeneidad accidental de los diferentes grupos de participantes, se utiliza este enfoque puesto que el estudio implica interrumpir el tránsito de las personas, por lo tanto, se busca disminuir el tiempo del experimento lo más posible y, además, se evita, de ese modo, el aprendizaje durante el experimento. Respecto a lo último, por ejemplo, una lectura del cuadro de informaciones del primer diseño mostrado podría disminuir la atención en el cuadro de informaciones del segundo.

6.3.3. Participantes

Los participantes son aquellos visitantes que transitan, principalmente en vehículo, en dirección al Parque Nacional Villarrica sector Rucapillán. Los visitantes en su mayoría son turistas (74,5%) que recorren el parque para realizar actividades en el centro de esquí, las cuevas volcánicas, de senderismo u otras actividades recreativas. El resto de los visitantes (25,5%) viven en el sector alrededor del volcán, pero también recorren el Parque Nacional Villarrica para realizar actividades recreativas, aunque algunos otros realizan sus trabajos en el sector, como guías y vendedores.

De una muestra de N=55 participantes: 61,8% son hombres y 38,2% mujeres. El rango de edad es entre los 14 y 67 años, de los cuales 7,3% son adolescentes, 54,5% adultos jóvenes, 27,3% adultos maduros, 3,6% ancianos y 7,3% no informaron su edad. La distribución de la edad es, la esperada para una población. Sin embargo, hay un sesgo moderado de la cantidad de hombres que participaron, pero no debería representar un problema según lo establecido por Haynes *et al.* (2007).

Se debe considerar también que la aplicación del estudio fue durante la Alerta Amarilla del volcán Villarrica, estando apenas una semana atrás en Alerta Naranja (15 de septiembre). Por lo tanto, los participantes tienen una característica añadida que, a pesar de la advertencia, se acercan de todos modos al volcán, independiente de sus circunstancias individuales.

6.3.4. Materiales

Los materiales necesarios para la aplicación del estudio (Fotografía 6.1) son los siguientes:

- 1) *Eye tracker* modelo *Eye Tribe*. Tiene una precisión entre 0.5° y 1° , trabaja con frecuencias de 30 y 60 Hz y su obtención de datos es a través de la posición de los ojos respecto a la cámara. El aparato debe ser puesto, al menos, a 50 cm aproximadamente del participante.
- 2) Computador *Pavilion All-in-One* de 23 pulgadas, con una resolución de 1.920 x 1.080 pixeles.
- 3) Mesa que permita colocar un computador y el *eye tracker* al menos a 50 cm de distancia del participante.
- 4) Silla con altura ajustable.
- 6) Mentonera. Recomendada para evitar el movimiento involuntario de los participantes.
- 7) Documento impreso de consentimiento informado (Fig. 1 *in* Anexo 6).
- 8) Cuestionario impreso de percepción y satisfacción (Fig. 2 *in* Anexo 6).



Fotografía 6.1: Materiales usados la aplicación del experimento. Se muestran el *eye tracker*, el computador, la mentonera, escritorio, silla y la carpeta con los cuestionarios de percepción y satisfacción.

6.3.5. Procedimiento

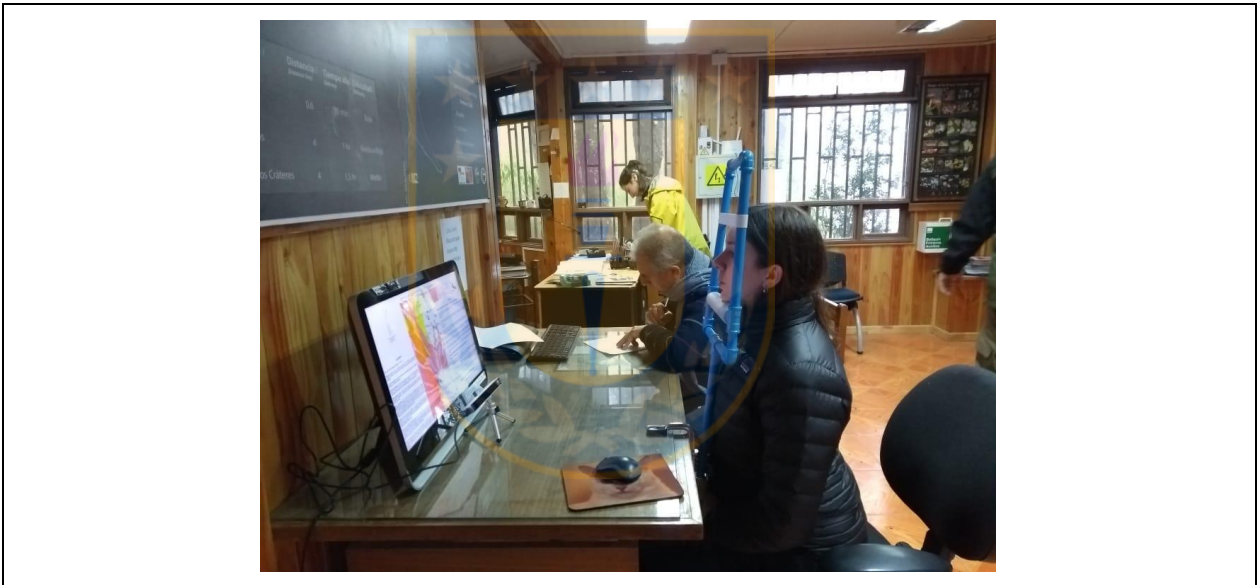
Las consideraciones previas que se deben tener al utilizar este tipo de tecnología son: tener un conocimiento adecuado de cómo registra la información el *eye tracker*, conocer sus limitaciones

técnicas y optimizar su uso. Para esto el aparato fue testeado muchas veces en diferentes condiciones y con diferentes personas.

El estudio se realizó entre el 21 y 22 de septiembre de 2019, fin de semana que sigue a las festividades patrias, esto para garantizar la captación de un número apropiado de voluntarios, puesto que en esas fechas el ingreso de visitantes al Parque Nacional Villarrica es alto.

Primero se le entregó el documento de consentimiento informado o se le explicó al visitante brevemente en qué consiste el estudio durante el proceso de captación.

Luego, de aceptar, se aplicó el estudio (Fotografía 6.2), comenzando con el experimento de seguimiento ocular, el cual inicia con el proceso de calibración, cuyas instrucciones se mostraron en la pantalla del computador o se explicaron brevemente al participante.



Fotografía 6.2: Aplicación del estudio de seguimiento ocular en terreno. En la foto se observa a tres participantes, uno aplicando el experimento de seguimiento ocular y dos contestando el cuestionario.

Las instrucciones escritas fueron: *“Siéntese en la silla, apoye su barbilla suavemente sobre la mentonera, apoye su frente sobre el elástico y pose sus brazos sobre la mesa. Mantenga su cabeza fija, evite moverse. Solo mueva sus ojos mirando a la pantalla todo el tiempo que dure el ejercicio. A continuación, se realizará primero el procedimiento de calibración. Aparecerá un círculo que se moverá de un punto a otro en la pantalla, usted debe seguir con sus ojos el círculo. Recuerde*

no mover su cabeza en ningún momento. Si la calibración no resulta aceptable, repita el procedimiento”.

Luego, el experimento continuó con la presentación en pantalla de uno de los diseños de los mapas de peligro, cuyas instrucciones fueron mostradas o explicadas brevemente. Las instrucciones escritas fueron: *“Observe el mapa que aparecerá después de calibrar. Al finalizar el experimento se le harán preguntas en un cuestionario. No hay tiempo límite, por lo que usted cuando sienta que está listo diga OK al examinador. Si usted no comprende las instrucciones, consulte al examinador. Una vez termine de leer estas instrucciones diga OK al examinador”.* En el caso de observar al participante confundido, se le explicó que se imaginara que caminando por el Parque Nacional Villarrica se encontraba con el mapa durante su paseo y se acercaba a verlo.

El experimento consistió en una evaluación de los parámetros de seguimiento ocular a través de un enfoque *bottom-up*, es decir, se presenta el diseño del mapa de peligro sin plantear una tarea específica al participante, de ese modo, interpretar qué es lo que comunica el mapa a sus usuarios del modo más ecológico posible.

La última etapa del estudio fue la entrega o lectura del cuestionarios de percepción de riesgo y satisfacción para su contestación.

Finalmente, una vez terminado el estudio, se le entregó al participante una copia del documento de consentimiento informado y unos folletos informativos de la ONEMI y SERNAGEOMIN acerca de la prevención de peligros volcánicos y los puntos de encuentro, gentileza de los funcionarios de la CONAF sector Rucapillán.

6.4. Resultados

6.4.1. Consideraciones Previas

Teniendo en consideración que el experimento fue realizado en terreno y, en consecuencia, las condiciones de laboratorio no fueron las óptimas, se pidió a los usuarios calibrar el aparato de seguimiento ocular un máximo de tres veces, y en este trabajo se aceptan calibraciones desde moderadas (21,8%), a buenas (36,4%), hasta perfectas (34,5%).

Del total de participantes (N=55) se descartan 6 participantes por errores en la contestación del cuestionario de percepción y satisfacción, o por haber tenido una calibración pobre en el experimento, resultando en un total de N=49 sujetos, 26 que observaron el diseño propio (P) y, 23, el diseño del SERNAGEOMIN (G).

Los sujetos se identificaron con una etiqueta (ejemplo, 1-S1), cuya primera parte de la expresión representa P con la etiqueta uno y G con la etiqueta dos, y su segunda parte representa una individualización del sujeto que sirve para relacionar los resultados del experimento con los del cuestionario.

En los dos días en que se aplicó el estudio hubo cambios leves en el procedimiento, esto debido a las dificultades propias al principio de su aplicación y por las lecciones aprendidas durante desarrollo de éste. Por ejemplo: al principio solo se les entregó el cuestionario, después, se le leyó las preguntas, esto para evitar ambigüedades en la interpretación de las preguntas, puesto que los participantes fueron reacios a hacer consultas.

El análisis consiste, primero, en la aplicación de la prueba estadística ANOVA a la matriz 2 x 2 de las variables independientes, de este modo, se evalúa si existen diferencias significativas entre los diseños de los mapas con un mismo nivel de percepción de riesgo. Luego, se aplica ANOVA considerando únicamente los diseños, es decir, sin considerar la percepción de riesgo como variable.

La prueba ANOVA (F) rechaza o acepta la hipótesis nula ajustada con un 95% de confianza. De rechazar la hipótesis se procede a realizar la prueba *Shapiro-Wilk* para comprobar si cada muestra de datos ($n < 30$) presenta una distribución normal, para decidir si aplicar *T-test* (T) si ambas muestras lo presentan, y la prueba *Kruskal-Wallis* (K) si al menos una no. Estas pruebas permiten comprobar si existe una variación significativa en las varianzas de dos o más conjuntos de datos. Los resultados son informados con el promedio de la muestra (y su desviación estándar) y con diagramas de cajón y bigotes de cada uno estos; y las pruebas estadísticas son informadas con las expresiones F, T o K respectivamente, el valor de su estadístico y de su probabilidad p . Se rechaza la hipótesis nula si $p < 0,05$. Los resultados de la prueba *Shapiro-Wilk* no se informan explícitamente. Estos procedimientos se realizan utilizando la aplicación *XLSTAT* 2019.

6.4.2. Resultados del Análisis de Percepción de Riesgo

Se determina la percepción del riesgo de cada sujeto por eje temático (Tabla 6.6), primero, cuantificando sus respuestas: si es positiva a la percepción de riesgo, se le asigna un valor “1” y, si no, “0”. Para cada sujeto se calcula, primero, el promedio de sus respuestas por eje temático. Luego se calcula un promedio total del eje temático y, además, su desviación estándar. Estos cálculos se utilizan para calcular luego la diferencia entre el promedio de las respuestas individuales con el promedio del eje temático y dividirlo por la desviación estándar del eje temático. Esto garantiza, primero, que existan valores de percepción de riesgo individuales de cada eje temático por encima y por debajo del promedio, y que a la vez sean comparables entre sí, equiparando las dispersiones que pueden existir entre cada promedio del eje temático. A los ejes temáticos: conocimientos de peligros volcánicos, conocimientos prácticos y pericia, se le duplica sus valores para darles mayor peso, puesto que se ha comprobado en estudios anteriores que éstos tienen un peso importante en el uso de los mapas.

Tabla 6.6: Percepción de riesgo de los sujetos de estudio por eje temático. Los ejes temáticos son conocimiento de peligros volcánicos (CPV), conocimiento práctico (CP), experiencia previa (EP), pericia (P), conducta de prevención (CDP), confianza en las autoridades (COA), ilusión de invulnerabilidad (II), conducta de autoprotección (CA) y acciones para disminuir el riesgo (ADR). Percepción de riesgo positiva (tonos azules) y negativa (tonos rojos).

ID	CPV	CP	EP	P	CDP	COA	II	CA	ADR
1-S10	0,88	-2,31	-0,59	-0,11	0,19	0,51	-0,21	0,94	-0,55
1-S11	3,28	1,81	-0,59	1,73	1,25	-1,87	0,95	-0,45	-0,55
1-S12	0,88	1,81	0,53	3,56	-0,86	0,51	-0,21	-0,45	1,14
1-S13	0,88	-2,31	-0,59	-1,95	0,19	0,51	-0,21	0,94	-0,55
1-S14	-1,52	-0,25	-0,59	-0,11	-0,86	0,51	-2,54	-0,45	-0,55
1-S15	3,28	3,87	2,77	3,56	2,30	0,51	0,95	-0,45	1,14
1-S16	-1,52	-0,25	-0,59	1,73	1,25	-3,06	0,95	-1,85	1,14
1-S17	0,88	3,87	0,53	1,73	2,30	-0,68	0,95	-0,45	-0,55
1-S19	-1,52	-2,31	0,53	-0,11	-0,86	0,51	-0,21	0,94	-0,55
1-S20	3,28	1,81	-0,59	1,73	1,25	0,51	0,95	0,94	1,14
1-S21	-1,52	-0,25	-0,59	-0,11	0,19	0,51	0,95	-0,45	-0,55
1-S22	3,28	-0,25	-0,59	-1,95	-0,86	0,51	0,95	0,94	1,14
1-S23	-1,52	-2,31	-0,59	-1,95	-0,86	0,51	-0,21	-0,45	-0,55
1-S24	0,88	-2,31	-0,59	1,73	0,19	-1,87	0,95	-0,45	-0,55
1-S25	0,88	1,81	0,53	3,56	1,25	0,51	0,95	-1,85	-0,55

Tabla 6.6 (continuación): Percepción de riesgo de los sujetos de estudio por eje temático.

ID	CPV	CP	EP	P	CDP	COA	II	CA	ADR
1-S26	-1,52	-0,25	-0,59	-1,95	-0,86	-1,87	-0,21	0,94	1,14
1-S27	0,88	-2,31	-0,59	-1,95	-0,86	0,51	-1,38	0,94	-0,55
1-S28	3,28	-0,25	1,65	3,56	0,19	0,51	0,95	-0,45	1,14
1-S30	-1,52	3,87	2,77	3,56	1,25	0,51	-0,21	-0,45	-0,55
1-S31	0,88	-2,31	-0,59	-0,11	-0,86	0,51	0,95	0,94	-0,55
1-S32	-1,52	1,81	1,65	1,73	0,19	0,51	-0,21	-0,45	-0,55
1-S4	-1,52	-0,25	-0,59	-0,11	-0,86	0,51	-1,38	-0,45	-2,24
1-S5	-1,52	1,81	-0,59	-1,95	0,19	0,51	0,95	0,94	-0,55
1-S7	0,88	-0,25	-0,59	1,73	-0,86	0,51	0,95	0,94	1,14
1-S8	-1,52	-0,25	-0,59	-0,11	0,19	0,51	-1,38	-1,85	-0,55
1-S9	0,88	-0,25	-0,59	-0,11	-0,86	0,51	0,95	-1,85	-0,55
2-S1	0,88	3,87	2,77	3,56	2,30	0,51	0,95	-1,85	-0,55
2-S11	-1,52	-0,25	-0,59	-1,95	-0,86	0,51	-1,38	0,94	-2,24
2-S13	0,88	1,81	-0,59	-0,11	1,25	-0,68	-0,21	0,94	1,14
2-S15	-1,52	-2,31	-0,59	-1,95	0,19	0,51	-0,21	0,94	1,14
2-S16	0,88	-0,25	-0,59	-1,95	-0,86	-3,06	-1,38	0,94	1,14
2-S17	3,28	1,81	1,65	3,56	0,19	-1,87	0,95	-1,85	1,14
2-S18	-1,52	-2,31	-0,59	-1,95	0,19	0,51	0,95	-0,45	-0,55
2-S19	3,28	-0,25	-0,59	-1,95	2,30	-0,68	0,95	-0,45	-0,55
2-S20	-1,52	-2,31	0,53	-1,95	0,19	-0,68	-0,21	0,94	1,14
2-S21	-1,52	-0,25	-0,59	-1,95	0,19	0,51	-0,21	0,94	-0,55
2-S22	-3,92	-0,25	0,53	-1,95	-0,86	0,51	0,95	0,94	-0,55
2-S23	-3,92	-0,25	-0,59	-1,95	-0,86	0,51	-1,38	0,94	-0,55
2-S24	3,28	3,87	1,65	-0,11	-0,86	0,51	-0,21	-0,45	-0,55
2-S25	0,88	-2,31	-0,59	-0,11	0,19	0,51	-0,21	0,94	-0,55
2-S26	0,88	-0,25	-0,59	-1,95	-0,86	-0,68	0,95	-1,85	1,14
2-S27	-1,52	-0,25	-0,59	-1,95	-0,86	0,51	-1,38	-0,45	-2,24
2-S3	-1,52	-2,31	-0,59	-0,11	-0,86	-1,87	-2,54	0,94	1,14
2-S4	-1,52	3,87	0,53	1,73	0,19	0,51	0,95	0,94	-0,55
2-S5	0,88	-2,31	-0,59	-0,11	-0,86	0,51	-0,21	0,94	-0,55
2-S6	0,88	-2,31	0,53	-1,95	-0,86	0,51	-0,21	-0,45	1,14
2-S7	-1,52	-0,25	0,53	-1,95	-0,86	0,51	-0,21	-0,45	1,14
2-S8	0,88	-0,25	-0,59	1,73	0,19	0,51	-0,21	0,94	1,14
2-S9	-3,92	-0,25	-0,59	-1,95	-0,86	0,51	-1,38	-0,45	1,14

Finalmente, para la clasificación en las dos clases: “alta” y “baja”, se aplica *Clusters k-means* (determinante W) sobre los valores de percepción de riesgo de todos los ejes temáticos (Tabla 6.4), obteniéndose los centroides de percepción de riesgo (Tabla 6.7). De este modo se clasifican 17 sujetos con percepción de riesgo alta (A) y, 32, con percepción de riesgo baja (B).

Tabla 6.7: Objetos centroides de la percepción de riesgo. Se clasifican en valores muy alto (2,27 al 2,05), alto (1,16 al 0,57), medio (0,34 al -0,29), bajo (-0,37 al 0,62) y muy bajo (-1,09 al -1,20). Los ejes temáticos son conocimiento de peligros volcánicos (CPV), conocimiento práctico (CP), experiencia previa (EP), pericia (P), conducta de prevención (CDP), confianza en las autoridades (COA), ilusión de invulnerabilidad (II), conducta de autoprotección (CA) y acciones para disminuir el riesgo (ADR). Percepción de riesgo positiva (tonos azules) y negativa (tonos rojos).

	CPV	CP	EP	P	CDP	COA	II	CA	ARR
Baja	-0,62	-1,09	-0,42	-1,20	-0,40	0,06	-0,29	0,20	-0,62
Alta	1,16	2,05	0,79	2,27	0,75	-0,12	0,54	-0,37	1,16

Los sujetos con alta percepción de riesgo son:

1-S11, 1-S12, 1-S15, 1-S16, 1-S17, 1-S20, 1-S25, 1-S28, 1-S30, 1-S32, 1-S7, 2-S1, 2-S13, 2-S17, 2-S24, 2-S4 y 2-S8.

Los sujetos con baja percepción de riesgo son:

1-S10, 1-S13, 1-S14, 1-S19, 1-S21, 1-S22, 1-S23, 1-S24, 1-S26, 1-S27, 1-S31, 1-S4, 1-S5, 1-S8, 1-S9, 2-S11, 2-S15, 2-S16, 2-S18, 2-S19, 2-S20, 2-S21, 2-S22, 2-S23, 2-S25, 2-S26, 2-S27, 2-S3, 2-S5, 2-S6, 2-S7 y 2-S9.

De los resultados del análisis de percepción de riesgo se clasifican los sujetos de estudio en la matriz 2 x 2 de variables independientes, siendo el número de sujetos para cada variable: P x A (n=11), G x A (n=6), P x B (n=15) y P x A (n=17).

6.4.3. Resultados del Análisis del Estudio de Usabilidad

6.4.3.1. Satisfacción del Usuario

Para evaluar la satisfacción de cada usuario se promedia los valores cuantificados de la escala *Likert* (1,00= muy de acuerdo, 0,75= de acuerdo, 0,50= ni de acuerdo, ni en desacuerdo, 0,25= en desacuerdo y 0,00= muy en desacuerdo) para el grado de aprendizaje, utilidad y afección.

De la matriz 2 x 2, se obtiene un promedio P x A del grado de satisfacción 0,85 (0,16), de utilidad 0,90(0,23) y de afección 0,93(0,23); P x B, 0,76 (0,17), 0,84 (0,16) y 0,85 (0,21), respectivamente; G x A, 0,77 (0,25), 0,82 (0,20) y 0,67 (0,44), respectivamente; y G x B, 0,51 (0,29), 0,57 (0,36) y 0,53 (0,40), respectivamente (Fig. 6.13).

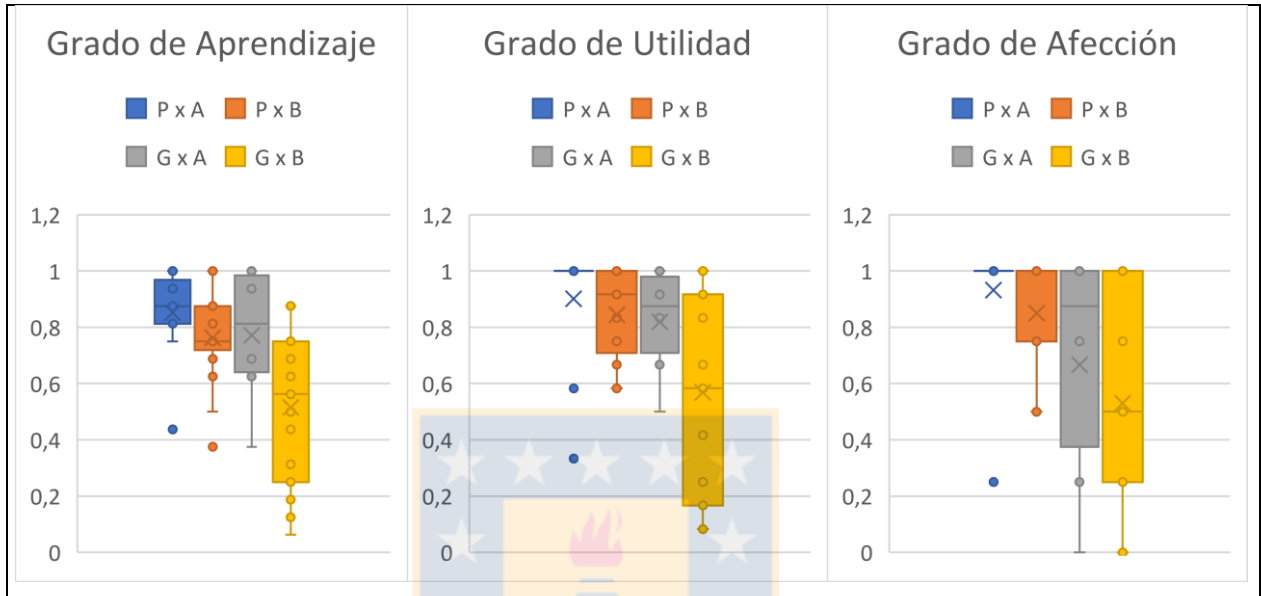


Figura 6.13: Diagrama de satisfacción según matriz 2 x 2. Son representando los grados de aprendizaje, utilidad y satisfacción. Los datos son representados en círculos. El promedio en cruz. Elaboración propia.

Por otro lado, los datos, sin considerar la influencia de la percepción de riesgo son, del promedio P del grado de satisfacción 0,80 (0,17), del grado de utilidad, 0,87 (0,19) y del grado de afección 0,88 (0,21); y del promedio G, 0,58 (0,30), 0,63 (0,34) y 0,57(0,41), respectivamente (Fig. 6.14).

Al aplicar la prueba ANOVA, para comparar cada grado de satisfacción de diferentes diseños y niveles de percepción, se rechaza la hipótesis nula para el grado de aprendizaje ($F=5,92$, $p\sim 0,00$), de utilidad ($F=4,67$, $p=0,01$) y de afección ($F=4,39$, $p=0,01$). Al proceder con la prueba estadística respectiva, se acepta la hipótesis nula entre P x A y G x A, tanto para el grado de aprendizaje ($K=0,26$, $p=0,61$), de utilidad ($K=2,45$, $p=0,13$), como de afección ($K=3,33$, $p=0,07$); en cambio se rechaza la hipótesis nula entre P x B y G x B, tanto para el grado de aprendizaje ($T=2,98$, $p=0,01$), de utilidad ($K=4,85$, $p=0,03$), como de afección ($K=5,40$, $p=0,02$).

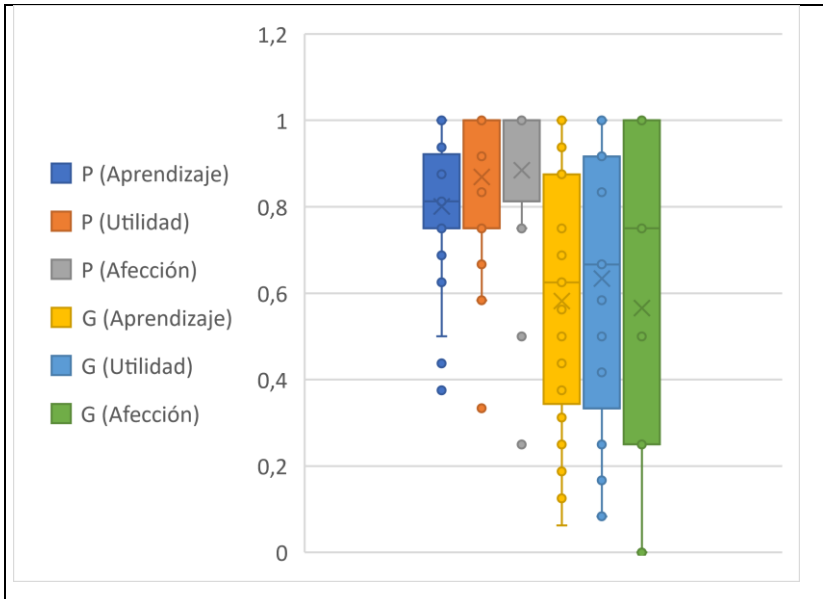


Figura 6.14: Diagrama de satisfacción según diseño. Son representando los grados de aprendizaje, utilidad y satisfacción. Los datos son representados en círculos. El promedio en cruz. Elaboración propia.

Sin considerar la influencia de la percepción de los usuarios como variable, al aplicar la prueba ANOVA para comparar las muestras de satisfacción en diferentes diseños, resulta en el rechazo de la hipótesis nula del grado de aprendizaje ($F=10,22$, $p\sim 0,00$), de utilidad ($F=9,24$, $p\sim 0,00$) y de afección ($F=12,18$, $n\sim 0,00$). Al proceder con la prueba estadística respectiva, también se rechaza la hipótesis nula para el grado de aprendizaje ($K=6,81$, $p=0,01$), de utilidad ($K=7,76$, $p=0,01$) y de satisfacción ($K=9,24$, $p\sim 0,00$).

6.4.3.2. Duración Promedio de Fijaciones

Se obtiene directamente el parámetro de duración promedio de fijaciones del programa OGAMA 5.0.1 para cada región de interés, siendo una, el *Mapa*, y la otra, el *Interfaz* (incluye el cuadro de informaciones o glosario, la leyenda y el título).

De la matriz 2 x 2, se obtiene un promedio de la duración promedio de fijaciones P x A del Mapa 204,59 ms (31,62 ms) e Interfaz 201,45 ms (53,02 ms); P x B, 192,64 ms (29,79 ms) y 179,92 ms (56,47 ms), respectivamente; G x A, 197,92 ms (14,89 ms) y 250 ms (79,49 ms), respectivamente; y G x B, 198,30 ms (33,65 ms) y 210,38 ms (74,72 ms), respectivamente (Fig. 6.15).

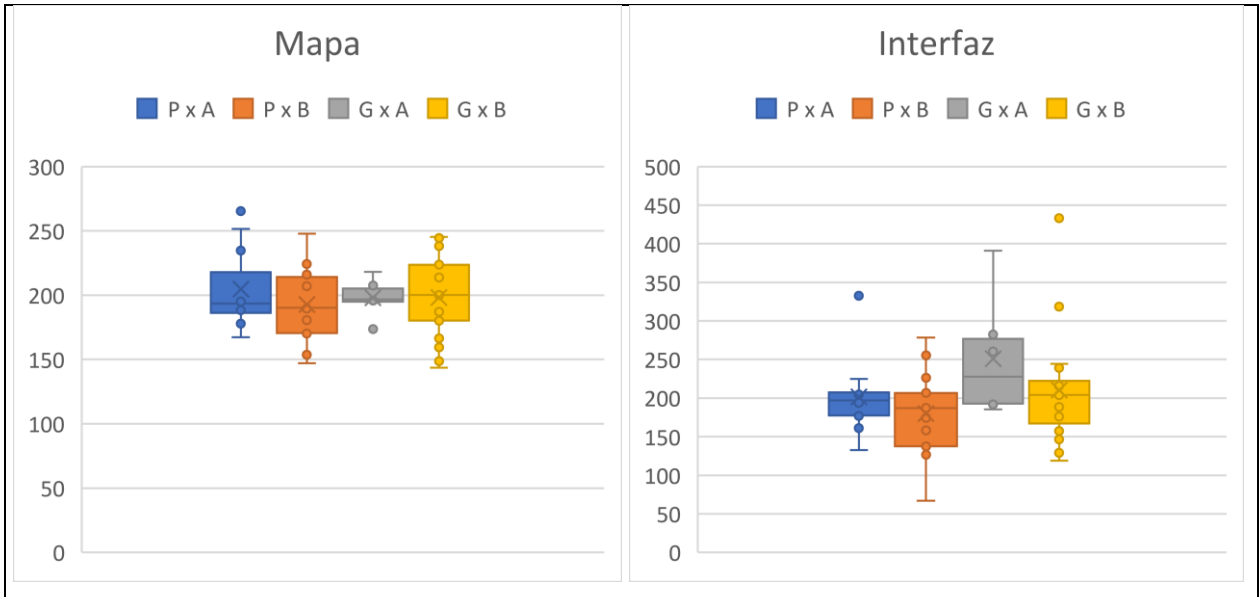


Figura 6.15: Diagrama de duración promedio de fijaciones según matriz 2 x 2. Se muestra la duración promedio de fijaciones en la región del Mapa e Interfaz. Los datos son representados en círculos. El promedio en cruz. Elaboración propia.

Por otro lado, de los datos, sin considerar la influencia de la percepción de riesgo como variable, se obtiene el promedio de duración de fijaciones P en la región del Mapa 197,69 ms (30,55 ms) e Interfaz 189,28 ms (54,85 ms); y, G, 198,20 ms (29,56 ms) y 220,97 ms (76,34 ms), respectivamente (Fig. 6.16).

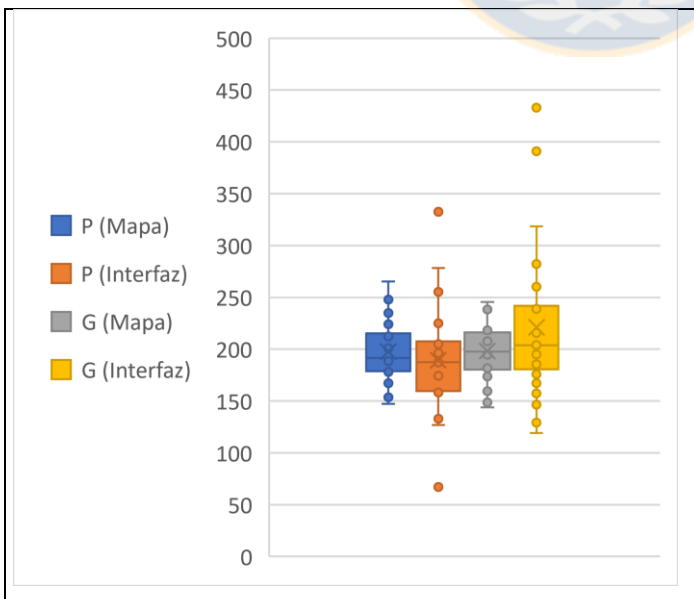


Figura 6.16: Diagrama de duración promedio de fijaciones según diseño. Se muestra la duración promedio de fijaciones en la región del Mapa e Interfaz. Los datos son representados en círculos. El promedio en cruz. Elaboración propia.

Al aplicar ANOVA, para comparar los valores de duración promedio de fijaciones en diferentes diseños y niveles de percepción, se acepta la hipótesis nula tanto para la región del Mapa ($F=0,33$, $p=0,81$), como del Interfaz ($F=1,76$, $p=0,17$). Por lo tanto, no se procede a aplicar ninguna prueba estadística. Del mismo modo, al aplicar ANOVA; para comparar los valores de duración promedio de fijaciones entre diferentes regiones, considerando el nivel de percepción, se acepta la hipótesis nula tanto para P x A ($F=0,03$, $p=0,87$), P x B ($F=0,58$, $p=0,45$), G x A ($F=2,58$, $p=0,14$) y G x B ($F=0,37$, $p=0,55$).

Al aplicar ANOVA, sin considerar la influencia de la percepción de riesgo, resulta también en la aceptación de la hipótesis nula entre ambos diseños, tanto para la región del Mapa ($F=0,00$, $p=0,95$), como del Interfaz ($F=2,61$, $p=0,11$). Del mismo modo, se acepta la hipótesis nula, al comparar ambas regiones, tanto para P ($F=0,46$, $p=0,50$), como G ($F=1,78$, $p=0,19$).

6.4.3.3. Proporción de Tiempo

La proporción de tiempo se calcula desde parámetros exportados de OGAMA 5.0.1. para cada región de interés. El tiempo que el usuario pasa mirando cada región se normaliza en el tiempo total usado en el experimento y, luego, se calcula la proporción entre la región del Mapa y del Interfaz. De la matriz 2 x 2, se obtiene un promedio P x A de la proporción de tiempo del Mapa 0,75 (0,23) e Interfaz, 0,25 (0,23); P x B, 0,72 (0,29) y 0,28 (0,29), respectivamente; G x A, 0,49 (0,33) y 0,51 (0,33), respectivamente; y G x B, 0,45 (0,27) y 0,55 (0,27), respectivamente (Fig. 6.17). Por otro lado, de los datos, sin considerar la influencia de la percepción de riesgo, se obtiene la proporción de tiempo P en la región del Mapa 0,73 (0,26) e Interfaz 0,27 (0,26); y, G, 0,46 (0,28) y 0,54 (0,28), respectivamente (Fig. 6.18).

Al aplicar ANOVA, para comparar la proporción de tiempo en diferentes diseños y niveles de percepción, resulta en el rechazo de la hipótesis nula, tanto para el Mapa ($F=4,05$; $p=0,01$), como para el interfaz ($F=4,05$; $p=0,01$). Al proceder a realizar la prueba estadística, para comparar si existe una diferencia significativa entre los diseños de un mismo nivel de percepción, se acepta la hipótesis nula entre P x A y G x A, para ambas regiones ($K=1,98$, $p=0,16$), sin embargo, se rechaza la hipótesis nula entre P x B y G x B, para ambas regiones ($K=6,31$, $p=0,01$).

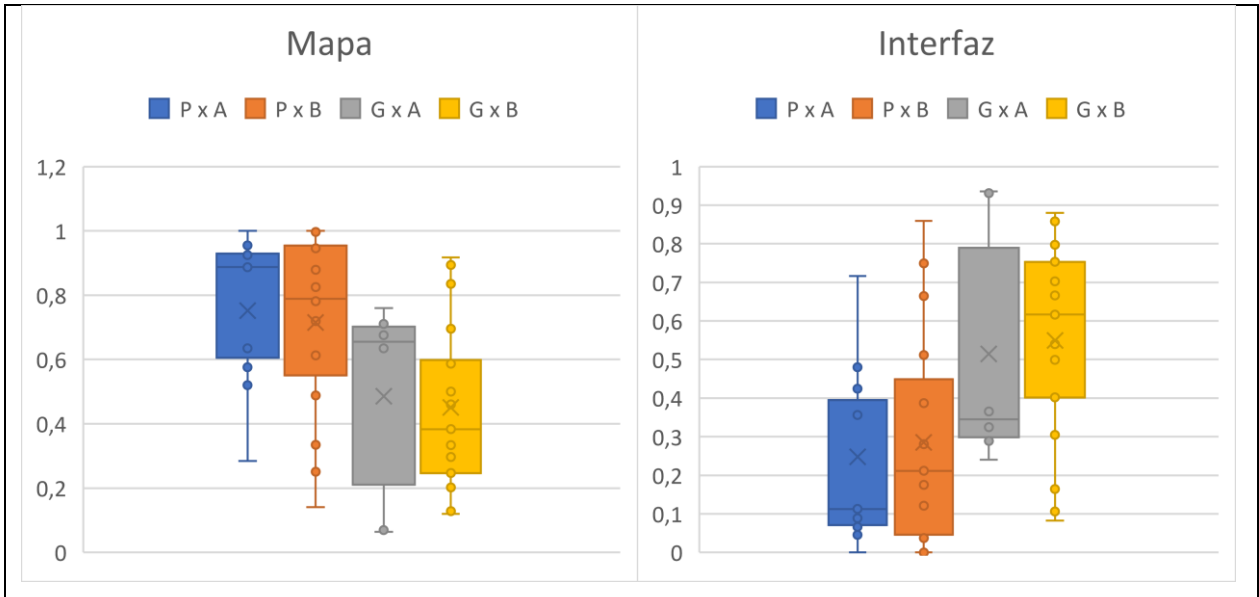


Figura 6.17: Diagrama de proporción de tiempo según matriz 2 x 2. Se muestra la proporción de tiempo en la región del Mapa e Interfaz. Los datos son representados en círculos. El promedio en cruz. Elaboración propia.

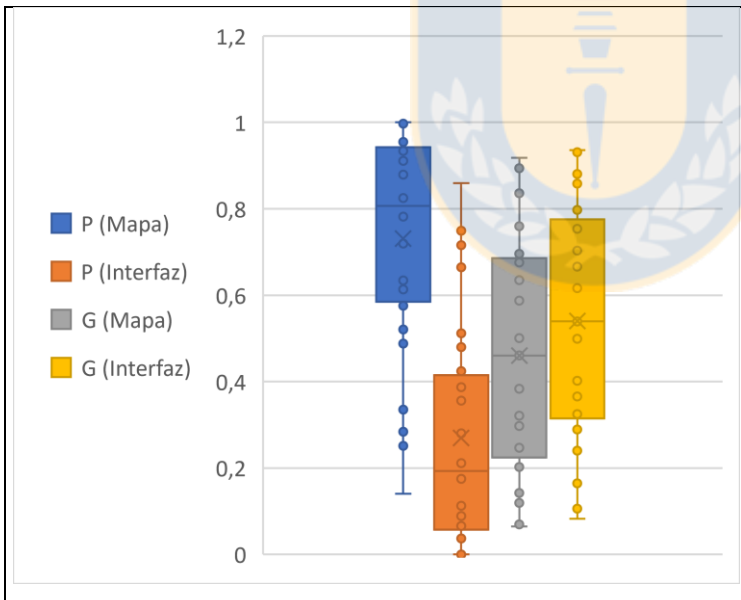


Figura 6.18: Diagrama de proporción de tiempo según diseño. Se muestra la proporción de tiempo en la región del Mapa e Interfaz. Los datos son representados en círculos. El promedio en cruz. Elaboración propia.

También, al aplicar ANOVA, para comparar la proporción de tiempo en diferentes regiones, considerando la influencia de los niveles de percepción, resulta en el rechazo de la hipótesis nula, tanto para P x A ($F=25,04$; $p \sim 0,00$), como P x B ($F=16,55$, $p \sim 0,00$), con sus respectivas pruebas estadísticas ($T=5,09$, $p \sim 0,00$) y ($T=4,10$, $p \sim 0,00$) que también la rechazan; sin embargo, se acepta la hipótesis nula, tanto para G x A ($F=0,02$, $p=0,88$), como G x B ($F=1,20$; $F=0,28$).

Al aplicar ANOVA, para comparar la proporción de tiempo de tiempo en diferentes diseños, sin considerar la influencia de la percepción de riesgo, se rechaza la hipótesis nula tanto para el Mapa, como el Interfaz ($F=12,44$, $p\sim 0,00$), cuyas pruebas estadísticas rechazan la hipótesis nula ($K=10,67$, $p\sim 0,00$). Lo mismo, para comparar la proporción de tiempo en diferentes regiones, se rechaza la hipótesis nula para P ($F=40,61$, $p\sim 0,00$), igualmente se rechaza con su prueba estadística ($T=6,37$, $p\sim 0,00$); sin embargo, se acepta la hipótesis nula para G ($F=0,97$; $p=0,33$).

6.4.3.4. Número de Fijaciones

El número de fijaciones se calcula desde parámetros exportados de OGAMA 5.0.1. para cada región de interés. El número de fijaciones absoluto en cada región se divide por la proporción de tiempo de la región de interés y, luego, se divide por la razón entre el área de la región de interés y el total del área de la región. De las áreas de interés, la región del Mapa P tiene una razón de 0,67 y el Interfaz P de 0,33, y la región del Mapa G tiene una razón de 0,34 y el Interfaz G de 0,66.

De la matriz 2 x 2, entonces, se obtienen los promedios P x A de la región del Mapa 254,31 (270,66) e Interfaz 466,05 (477,16); P x B, 180,11 (112,10) y 361,02 (252,41), respectivamente; G x A, 424,64 (403,22) y 165,54 (125,94), respectivamente; y, G x B, 611,46 (579,14) y 283,44 (210,37), respectivamente (Fig. 6.19).

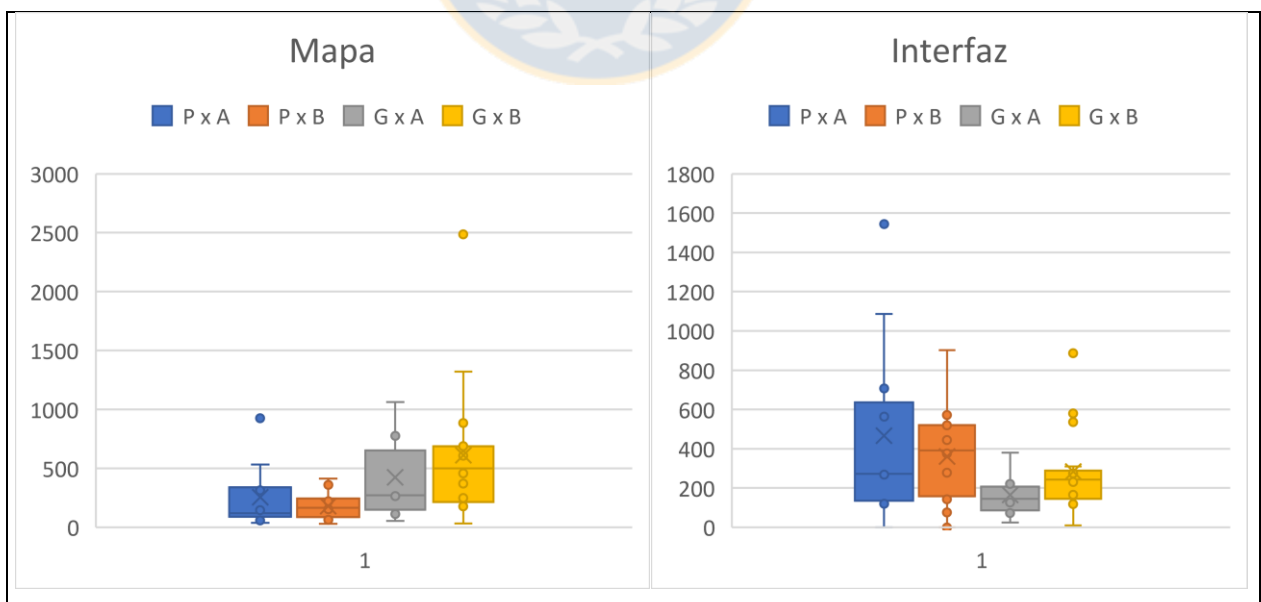


Figura 6.19: Diagrama de número de fijaciones según matriz 2 x 2. Se muestra el número de fijaciones en la región del Mapa e Interfaz. Los datos en círculos. El promedio en cruz. Elaboración propia.

Por otro lado, sin considerar la influencia de la percepción del riesgo, se obtiene un promedio P del Mapa 211,50 (194,26) e Interfaz 405,46 (356,93); y G, 562,72 (536,57) y 252,68 (196,45), respectivamente (Fig. 6.20).

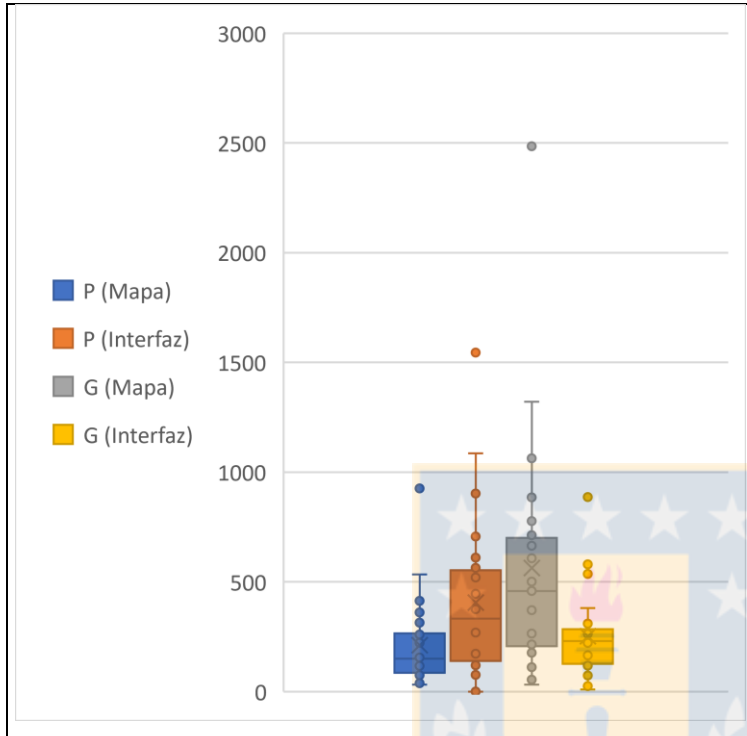


Figura 6.20: Diagrama de número de fijaciones según diseño. Se muestra el número de fijaciones del Mapa e Interfaz. Los datos son representados en círculos. El promedio en cruz. Elaboración propia.

Al aplicar ANOVA, para comparar el número de fijaciones en diferentes diseños y niveles de percepción, resulta en el rechazo de la hipótesis nula para el Mapa ($F=3,59$, $p=0,02$), con su prueba estadística aceptando la hipótesis nula entre $P \times A$ y $G \times A$ ($K=0,49$, $p=0,48$) y rechazándola entre $P \times B$ y $G \times B$ ($K=10,18$, $p \sim 0,00$), por otro lado, ANOVA resulta en la aceptación de la hipótesis nula para el Interfaz ($F=1,58$, $p=0,21$).

Luego, al aplicar ANOVA, para comparar el número de fijaciones en diferentes regiones, considerando también la influencia de los niveles de percepción, resulta en el rechazo de la hipótesis nula en $P \times B$ ($F=6,44$, $p=0,02$) y $G \times B$ ($F=4,82$, $p=0,04$), rechazando la hipótesis nula tanto en la prueba estadística en $P \times B$ ($T=-2,54$, $p=0,02$), como en $G \times B$ ($K=4,49$, $p=0,03$); sin embargo ANOVA resulta en la aceptación de la hipótesis nula en $P \times A$ ($F=1,64$, $n=0,22$) y $G \times A$ ($F=2,26$, $n=0,16$).

También, al aplicar ANOVA, sin considerar la influencia de la percepción de riesgo, para comparar número de fijaciones en diferentes diseños, del mismo modo se rechaza la hipótesis nula en el

Mapa ($F=9,72$, $p=\sim 0,00$), con su prueba estadística rechazando también la hipótesis nula ($K=10,15$, $p=\sim 0,00$); en cambio, ANOVA, aceptando la hipótesis nula en el Interfaz ($F=3,28$, $p=0,08$). Finalmente, al aplicar ANOVA, esta vez para diferentes regiones, se rechaza la hipótesis nula tanto en P ($F=5,85$, $p=0,02$), como en G ($F=6,77$, $p=0,01$), con sus respectivas pruebas estadísticas ($K=5,49$, $n=0,02$) y ($K=5,79$, $p=0,02$).

6.4.3.5. Promedio de la Longitud de las Sacadas

El promedio de la longitud de las sacadas es exportado directamente de OGAMA 5.0.1. De la matriz 2×2 , se obtiene un promedio P x A 184,66 px. (51,23 px.), P x B 186,32 px. (30,11 px), G x A 176,47 px. (45,87 px.) y G x B 176,15 px. (42,56 px.) (Fig. 6.21). Por otro lado, considerando los datos sin influencia de la percepción de riesgo como variable, se obtiene un promedio P 185,62 px. (39,47 px.) y G 176,24 px. (42,37 px.) (Fig. 6.21).

Al aplicar ANOVA para comparar la longitud de las sacadas en diferentes diseños, tanto considerando la percepción de riesgo ($F=0,21$, $p=0,89$), como no ($F=0,64$, $p=0,43$), se acepta la hipótesis nula.

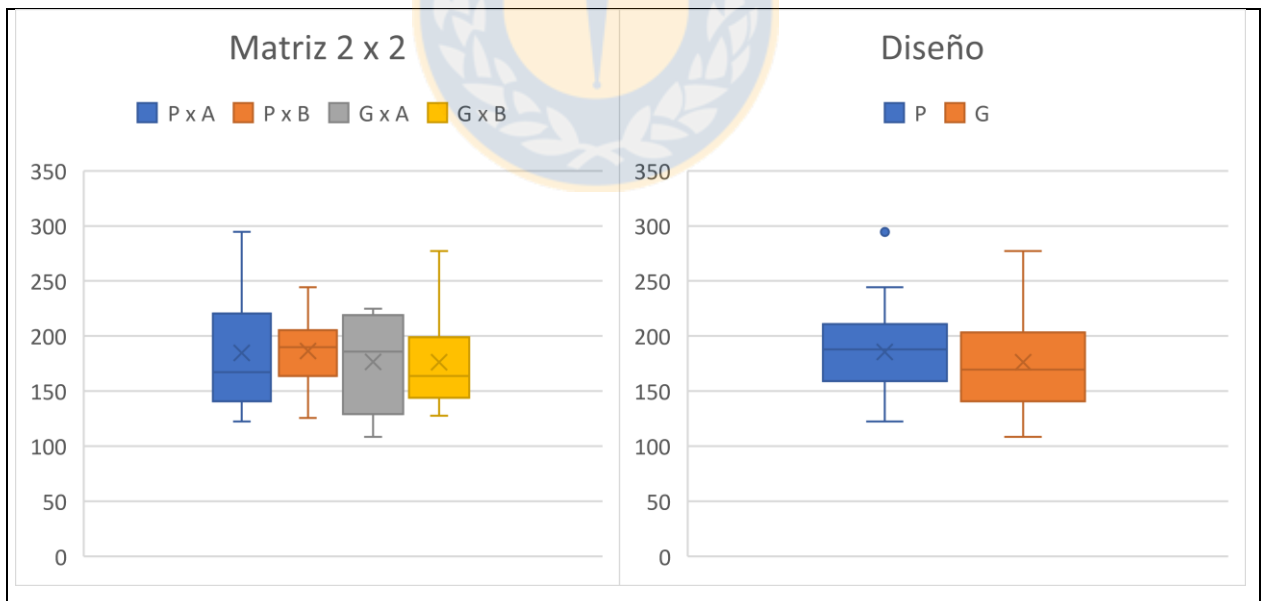


Figura 6.21: Diagramas de promedio de longitud de sacadas según matriz 2×2 y diseño. A la izquierda se muestra el diagrama según la matriz 2×2 y, a la derecha, según el diseño. Los datos son representados en círculos. El promedio en cruz. Elaboración propia.

6.4.3.6. Mapa de Atención Visual

Del programa OGAMA 5.0.1 se exportan un total de 12 mapas gaussianos de atención visual, tanto de total de fijaciones, como de la primera y segunda fijación de cada diseño en estudio (Anexo 7), tanto considerando la percepción de riesgo, como no.

Para evaluar la atención visual de los elementos contenidos en los mapas se comparan entre sí, primero, entre usuarios de alta y baja percepción de riesgo. Esto considerando, tanto los mapas de total de fijaciones del diseño propio (Fig. 6.22), como del diseño del SERNAGEOMIN (Fig. 6.23). También, considerando los mapas de primera y segunda fijación, tanto del diseño propio (Fig. 24), como del diseño del SERNAGEOMIN (Fig. 6.25). Luego, se comparan entre todos los usuarios, sin distinción de su percepción de riesgo, los mapas generados entre los dos diseños. Considerando, tanto el mapa de total de fijaciones (Fig. 6.26), como el de primera y segunda fijación (Fig. 6.27). Estos mapas son interpretados con observaciones directa respecto a la densidad de fijaciones y direcciones desde la primera hasta la segunda fijación, respectivamente.

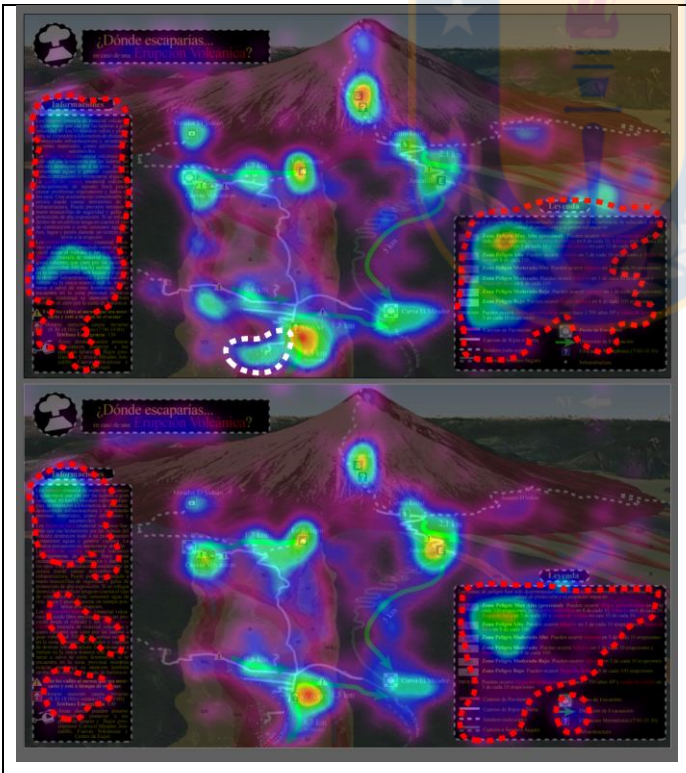


Figura 6.22: Comparación de mapas de total de fijaciones del diseño propio por percepción de riesgo. En líneas discontinuas rojas y blancas se destacan las diferencias relevantes entre un nivel de percepción alta (mapa de arriba) y baja (mapa de abajo). Los colores cálidos representan una mayor atención visual de los usuarios.

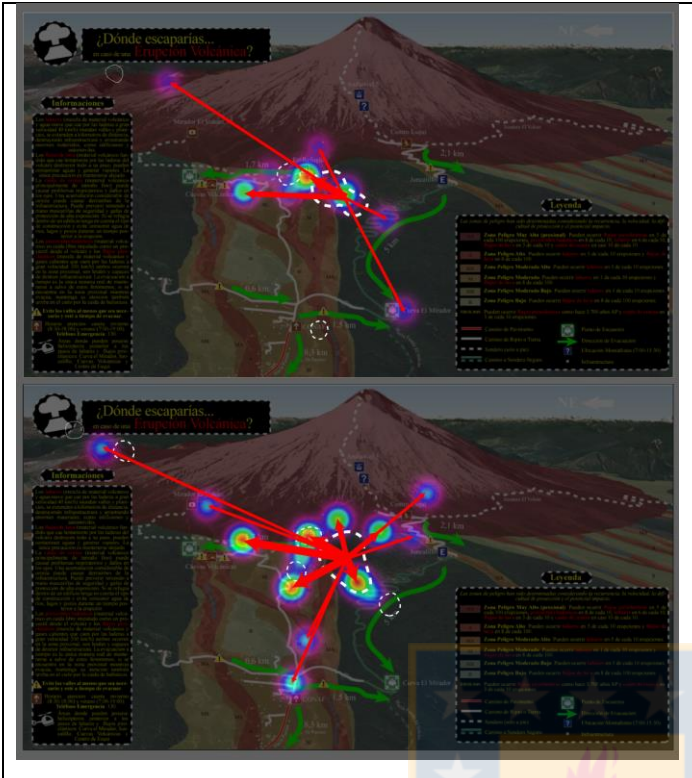


Figura 6.23: Comparación de mapas de primera y segunda fijación del diseño propio por percepción de riesgo. Dirección desde la primera fijación hacia la segunda (flecha roja). El grosor, es su orden de importancia. Nivel de percepción alta (mapa de arriba) y baja (mapa de abajo). Los colores cálidos representan una mayor atención visual de los usuarios.

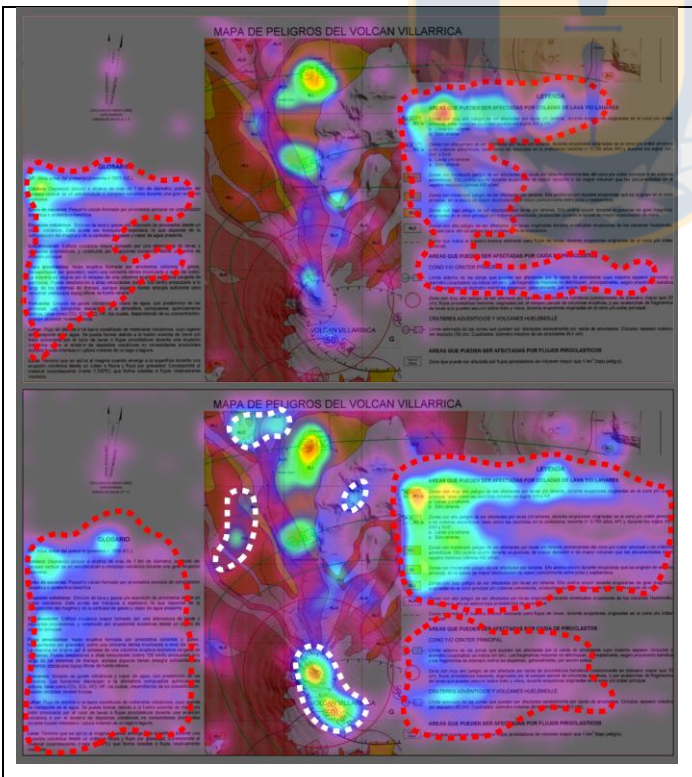


Figura 6.24: Comparación de mapas de total de fijaciones del diseño del SERNAGEOMIN por percepción de riesgo. En líneas discontinuas rojas y blancas se destacan las diferencias relevantes entre un nivel de percepción alta (mapa de arriba) y baja (mapa de abajo). Los colores cálidos representan una mayor atención visual de los usuarios.

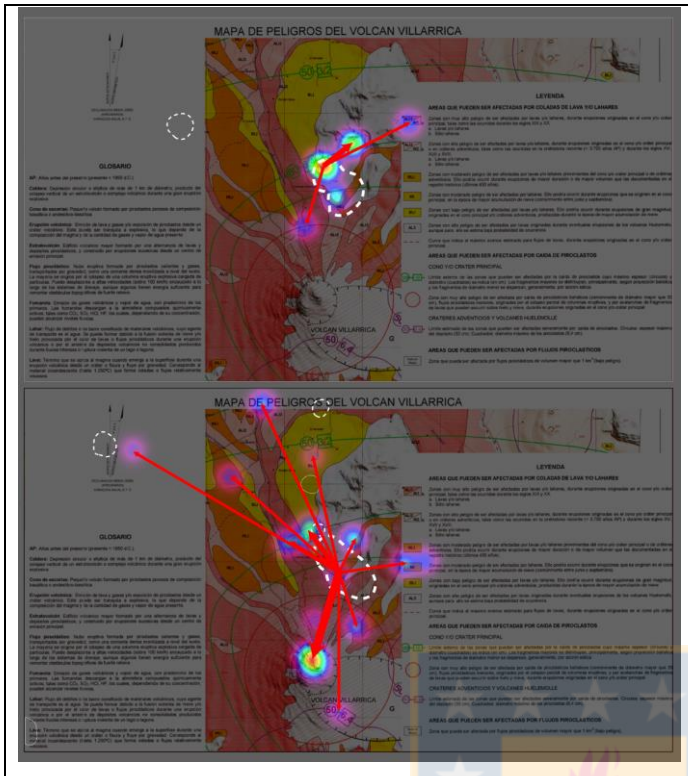


Figura 6.25: Comparación de mapas de primera y segunda fijación del diseño del SERNAGEOMIN por percepción de riesgo. Dirección desde la primera fijación hacia la segunda (flecha roja). El grosor, es su orden de importancia. Nivel de percepción alta (mapa de arriba) y baja (mapa de abajo). Los colores cálidos representan una mayor atención visual de los usuarios.

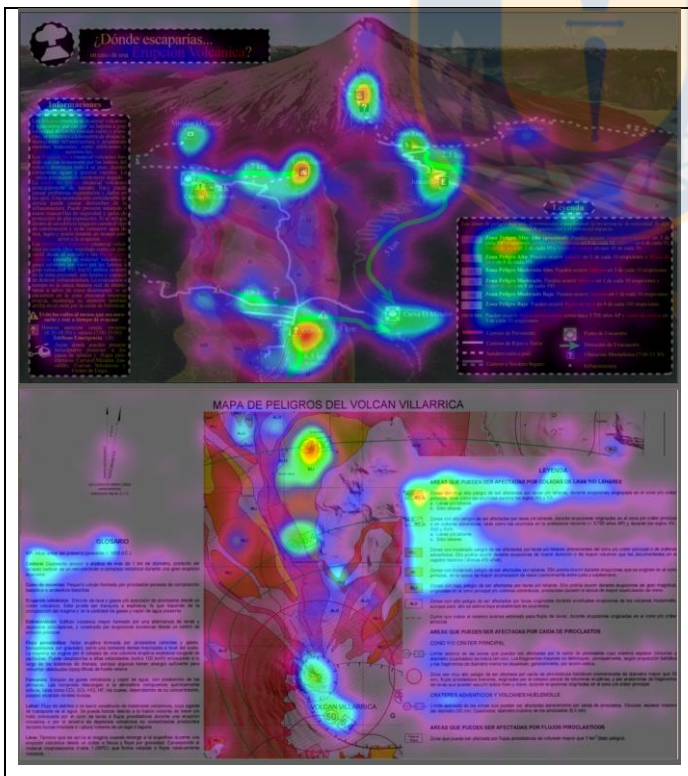


Figura 6.26: Comparación de mapas de total de fijaciones del diseño propio con el del SERNAGEOMIN. Diseño propio (mapa de arriba) y diseño del SERNAGEOMIN (mapa de abajo). Los colores cálidos representan una mayor atención visual de los usuarios.

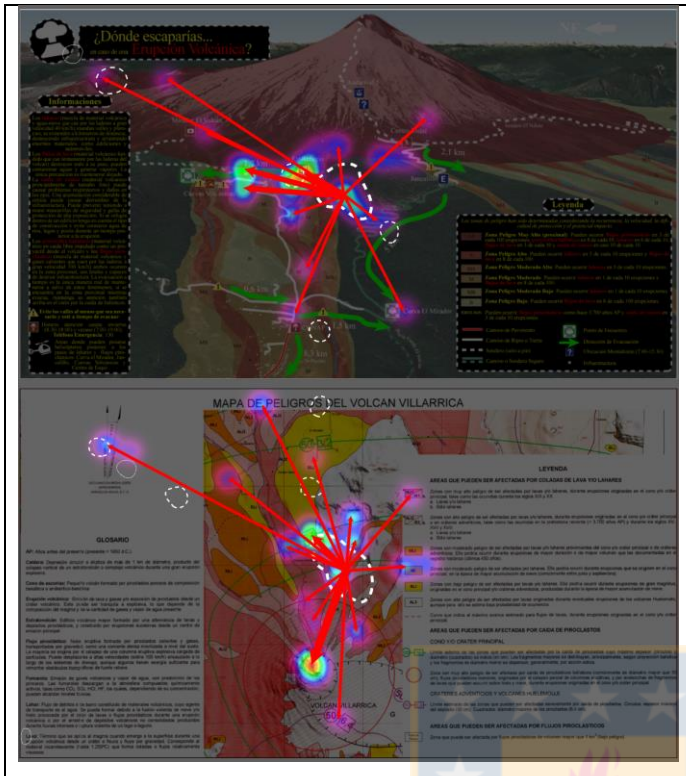


Figura 6.27: Comparación de mapas de primera y segunda fijación del diseño propio con el del SERNAGEOMIN. Dirección desde la primera fijación hacia la segunda (flecha roja). El grosor, es su orden de importancia. Diseño propio (mapa de arriba) y diseño del SERNAGEOMIN (mapa de abajo). Los colores cálidos representan una mayor atención visual de los usuarios.

6.5. Discusiones

En este subcapítulo se discute con detalle las limitaciones e incertidumbres, tanto intrínsecas, como de la toma de decisiones asociadas a la comunicación de peligros y a la metodología utilizada, desde los procesos de simplificación del mapa de peligro, hasta su evaluación como herramienta de comunicación mediante el uso de tecnología de seguimiento ocular y cuestionarios de percepción y satisfacción; así como también se plantean algunas consideraciones y se sugieren otros posibles estudios y lineamientos de cómo evaluar y mejorar las herramientas comunicacionales para futuros trabajos. Finalmente, se discuten las conclusiones e interpretaciones de los resultados del estudio de usabilidad y las implicancias que tienen en el uso para los usuarios y, de manera retroalimentativa, se establecen qué características pueden ser mejoradas del diseño elaborado en este trabajo.

6.5.1. Comunicación de Peligros Volcánicos

Con base en lo establecido en el capítulo 2.4, se discuten los siguientes puntos:

1) Existen una enorme cantidad de maneras de comunicar una idea, desde el lenguaje paraverbal, pasando por la transmisión oral, hasta la información escrita y gráfica. Ciertamente, el tema que se atañe a los objetivos de este trabajo son la elaboración de mapas, sin embargo, debe considerarse entre las incertidumbres comunicacionales la elección, primero, gráfica de la información y, luego, la elección de mapas para transmitir información acerca de peligros volcánicos y planes de emergencia. Tener presente este punto, permite abrir un gran campo de exploración a todo tipo de herramientas comunicacionales desde folletos, infogramas, medios audiovisuales, charlas e, incluso, la conversación en la vida cotidiana.

2) Los gráficos, en concreto, proporcionan la ventaja de ser fácilmente replicables y traspasables de mano en mano, tanto impreso, como en digital. También conservan, una vez finalizado su elaboración, la intención comunicativa del emisor en el tiempo. Sin embargo, una vez llega al receptor, esta intención queda sometida a su interpretación, por lo que poseen la desventaja que el autor normalmente no está presente *in situ* para aclarar puntos o confusiones. Debido a esta desventaja, surge la necesidad de explorar el cómo mostrar estas herramientas gráficas, de modo de que la idea comunicada sea transmitida de la manera más certera y eficiente posible. Existen disciplinas especialmente dedicadas a explorar esta problemática, como el diseño gráfico, la psicología cognitiva y las neurociencias. El desarrollo futuro de estas disciplinas puede seguir mejorando la elaboración de mapas de peligro volcánico.

3) Los mapas, en particular, proporcionan información de manera efectiva acerca de la posición espacial de los elementos que se encuentran en la realidad, debido a esto es el medio más utilizado por usuarios de todos los niveles de audiencia para comunicar e informarse de toda clase de información georreferenciada, incluido los peligros volcánicos. Los mapas como gráficos también presentan limitaciones, tanto en su interpretación, como en la eficiencia de su uso. Normalmente los mapas cartográficos necesitan de un proceso de aprendizaje previo para que su uso sea plenamente efectivo. Un panorama positivo en el uso de mapas como herramientas de comunicación es que, en plena era digital, aplicaciones móviles como *Google Maps* y *Waze*, por mencionar algunos, permiten a usuarios no especializados familiarizarse en el uso básico de los mapas.

4) El diseño orientado a la atención es una de las muchas metodologías de diseño de mapas que pueden ser encontradas en la basta cantidad de información disponible. Sin embargo, se ha

considerado ésta, porque ha sido probada empíricamente con tecnología de seguimiento ocular. La elección de otras metodologías y formatos asociados están disponibles en diversas revistas especializadas para su utilización y evaluación de usabilidad. Un ejemplo, puede ser una metodología basada en el uso de infografía, de modo que se incorporen infogramas con explicaciones paso a paso de qué hacer durante una erupción, vinculados a la posición geográfica en un mapa. También, de la elección de las características visuales, se debe considerar que existen muchos trabajos que testean la saliencia visual de diversos elementos visuales. Explorar nuevas características visuales pueden mejorar este diseño.

5) La unidad de percepción escogida para mostrar los peligros son las coropletas, menos complejas visualmente que los puntos discretos y líneas. Aunque otros formatos como isolíneas de tiempo de llegada también han probado ser efectivos. Sin embargo, no se contaba con esta información y no pudo ser utilizada. Es posible también explorar otros formatos para comunicar peligros, como puede ser el de presentar los íconos de los sitios conocidos con un esquema secuencial de colores que represente el grado de peligro al cuál se ve amenazado tal punto. Esto podría responder directamente a preguntas como: ¿qué tan amenazado está la oficina de la CONAF?, o, ¿qué tiene mayor amenaza, el centro de esquí o las cuevas volcánicas?. También podría ser representado los peligros en coropletas con tonos graduados en sus límites, de manera de representar la incertidumbre asociada a los límites del alcance de los peligros volcánicos.

6) Existen limitaciones también en la elección de sitios conocidos y rutas. Por ejemplo, durante la aplicación del estudio de usabilidad, en conversaciones con visitantes y lugareños, se tuvo conocimiento de senderos que no se tenían en consideración durante la confección del mapa, como el sendero Rucapillán y otros senderos que suben cerros, los cuales no están en las bases de datos usados en este trabajo. Por otro lado, se debe considerar que nuevos sitios conocidos y rutas son establecidas en el tiempo, incluso algunos sitios pueden desaparecer. Entonces, para futuras consideraciones, una exploración adecuada en terreno y conocimiento de las personas que viven en el lugar, es decir aplicar un enfoque de gestión *bottom-up*, puede ser fundamental también para este apartado, puesto que no considerar el conocimiento de las comunidades, puede disminuir la efectividad de la comunicación con éstas.

7) Se debe considerar que los planes de emergencia también son actualizados en el tiempo. Por lo tanto, una actualización en el plan involucra también una actualización del mapa simplificado.

Además, los planes de emergencia tampoco son soluciones 100% efectivas ante catástrofes naturales, puesto que los fenómenos volcánicos son muchas veces impredecibles. Sin embargo, se establece en este trabajo la necesidad de comunicarlas como verdades, puesto que el objetivo final del mapa es incidir que el usuario participe voluntariamente de las evacuaciones y facilitar la gestión de los funcionarios a cargo. Se asume que cualquier información que involucre una incertidumbre en el plan podría incidir negativamente su aplicación, sin embargo, esa premisa puede ser discutida. Trabajos futuros pueden explorar estas cuestiones, explorando cómo influye la incertidumbre en los planes de emergencia en la percepción de riesgo de los usuarios.

8) Finalmente, en cuanto al interfaz, todas las decisiones tomadas deben ser revisadas para futuros trabajos, puesto que las tomas de decisiones en este apartado fueron hechas con base en la intuición (como la utilización de algunos íconos, el uso de alto contraste y el realce de palabras claves), por lo que una revisión bibliográfica apropiada de artículos del área del diseño gráfico puede vislumbrar más acerca de cómo distribuir la información en un cuadro de texto, qué características visuales, como: el margen, separación entre letras y versos, colores, fuentes y demás; son las más efectivas para la lectura.

6.5.2. Estudio de Usabilidad

1) Existen muchas maneras de realizar un estudio de usabilidad para probar la efectividad de un producto determinado. El método escogido en este trabajo es incorporando la tecnología de seguimiento ocular y un cuestionario de percepción y satisfacción, el cual presenta la ventaja de registrar métricas objetivas relacionadas a lo que los usuarios están mirando en el mapa. De otros trabajos basados únicamente en cuestionarios, siempre es esperable cierto grado de subjetividad en las respuestas. Además, este trabajo permite interpretar la atención visual según niveles de percepción, lo cual es un método novedoso aplicado en este tipo de estudios.

2) Por otra parte, puede haber muchos métodos para evaluar la percepción de riesgo, se opta por hacer un cuestionario simple con preguntas de opción múltiple para evaluar varios ejes temáticos asociado a la percepción de riesgo, para calcular, finalmente, un puntaje comparativo. El método puede ser perfectible, tanto en la elección de preguntas, como en la evaluación de sus respuestas o el tratamiento estadístico utilizado. Sin embargo, de cualquier modo, entrega una información global acerca de las características del usuario evaluado en términos de su conocimiento,

experiencia y pericia en temas asociados a los riesgos y el uso del mapa, así como en su conducta en cuestiones de autoprotección o seguridad y en su confianza en las autoridades. Como se ha mencionado anteriormente, todos estos aspectos pueden tener influencia, tanto en la lectura de los mapas, así como en su comportamiento ante las indicaciones de los funcionarios en caso de emergencias; ambos puntos relevantes para este estudio.

3) Existen muchas maneras de enfocar un estudio de usabilidad según los objetivos del estudio (subcapítulo 2.5.1). Futuros trabajos podrían considerar un cambio de enfoque, como aplicar un estudio intra sujetos y, en consecuencia, aplicar un cuestionario de satisfacción comparativo entre los mapas en estudio; o realizar un estudio de caso particular, que involucre a participantes con características definidas, como funcionarios en planes de emergencia.

4) El procedimiento tiene algunos puntos perfectibles: el estudio se aplicó camino al centro de esquí y las cuevas volcánicas, en la entrada del Parque Nacional Villarrica, esto tuvo como consecuencia que muchos visitantes fueran reacios a participar, puesto que involucraba estacionar su auto, bajarse y entrar a la oficina de la CONAF. Acción que interrumpía el tránsito hacia sus actividades recreacionales. Una sugerencia por parte de los funcionarios de la CONAF, para futuros trabajos, es aplicar el estudio en el mismo centro de esquí.

5) Al aplicar el cuestionario de percepción de riesgo posterior a la observación del mapa, se puede discutir sobre si pudieron haber sido afectadas las respuestas entregadas en el cuestionario al usar un diseño u otro, puesto que 9 de las 26 preguntas podrían ser resueltas con una buena gestión de la memoria a corto plazo, pero no parece ser el caso, puesto que, de las preguntas: “¿cree que el volcán Villarrica podría hacer erupción otra vez?”, quienes respondieron positivamente, 57,1% miraron el diseño propio; “¿los lahares son similares a los aluviones?”, 46,2%; “¿en caso de erupción sabe cuál sería una zona segura dentro del Parque Nacional Villarrica?”, 57,1%; “¿en caso de erupción es mejor acercarse a los ríos?”, 53,1%; “¿en caso de erupción se verá afectado este lugar?”, 58,3%; “¿las erupciones son comunes en el volcán Villarrica?”, 58,6%; “en caso de alarma de erupción y aviso de evacuación, ¿prefiere quedarse donde está a esperar qué ocurre?”, 52,6%; “en caso de erupción, ¿se acercaría a la cumbre del volcán para observar lo que ocurre?”, 54,2%; y “¿considera adecuado que en los alrededores del volcán siga poblándose?”, 54,8%. Todos valores muy cercanos al 50%, por lo que un diseño u otro del mapa no fue un factor que influyese en las respuestas, esto posiblemente, debido al enfoque *bottom-up* de la tarea ejecutada

durante el experimento y, además, a que se les dijo a los participantes, al tiempo de contestar el cuestionario, que las primeras preguntas (del 1 al 26) eran generales a su percepción de riesgo y las últimas (27 al 34), las del cuestionario de satisfacción, estaban relacionadas con el mapa.

6) Acerca del enfoque *bottom-up*, también se sugiere, para futuros trabajos, realizar experimentos con enfoque *top-down*, lo cual permite utilizar los parámetros de seguimiento ocular para evaluar directa y objetivamente la eficiencia y eficacia del mapa a través de preguntas focalizadas, en contraposición de este trabajo, en que se evalúan la relevancia y complejidad del mapa.

6.5.3. Interpretación de la Percepción de Riesgo

Del análisis de percepción de riesgo, se puede interpretar que los participante con baja percepción de riesgo se caracterizan primero por tener muy bajos conocimientos prácticos y pericia, esto quiere decir que son vulnerables a cometer una equivocación como acercarse a los ríos o no dirigirse a zonas de seguridad en caso de erupción, así como también poseen nula o poca destreza asociado a volcanes, seguridad y mapas; además, tienen bajas experiencias previas, es decir, no han vivido nada relacionado a volcanes y evacuación, y bajas conductas de prevención, es decir tiene poca preparación para enfrentar una erupción; todo en comparación a los de alta percepción. En el resto de las variables no existen diferencias relevantes entre un grupo y el otro, es decir en la confianza en las autoridades, ilusión de invulnerabilidad y acciones para disminuir el riesgo.

6.5.4. Satisfacción del Usuario

La satisfacción es una variable subjetiva, la cual depende del grado de aprendizaje, utilidad y afección. La primera, consiste en qué tanto le pareció al participante que el mapa que vio era de fácil lectura, tanto en uso visual, como informativo. La segunda, consiste en qué tan relevante son la información clave presentada para los participantes, como en cuestiones peligros y seguridad. Finalmente, la tercera, qué tanto recomendaría su uso a otras personas.

Del análisis, se determina que todas las variables se comportan de manera uniforme, es decir, son correlacionables como un todo, por lo tanto, desde este punto son tratadas en su conjunto como el grado de satisfacción.

Si se considera la percepción de riesgo como variable, los participantes con alta percepción de riesgo no presentaron diferencias en su grado de satisfacción. Sin embargo, los participantes con baja percepción de riesgo sí, resultando favorable para el diseño propio.

Si no se considera la percepción de riesgo como variable, existe una diferencia significativa entre un diseño y el otro, también favoreciendo al diseño propio.

Por lo tanto, el diseño propio tiene un mayor grado de satisfacción que el diseño del SERNAGEOMIN, para usuarios con baja percepción de riesgo (y en general). En cambio, los usuarios con alta percepción no presentan una preferencia por uno u el otro.

6.5.5. Complejidad y Relevancia

Los parámetros de procesos cognitivos, como la duración promedio de fijaciones, es decir, la duración en que el usuario se focaliza en un único punto dentro del mapa; y la longitud promedio de sacadas, es decir, la distancia entre una fijación y la otra (como indicador de la eficiencia exploratoria); resultan ambas constantes en todos los diseños, niveles de percepción y regiones de interés. Por lo tanto, estos parámetros son irrelevantes en el análisis de complejidad y relevancia.

Entonces, del análisis de complejidad y relevancia se interpreta que:

- 1) Tanto para el Mapa, como el Interfaz, con usuarios que presentan una alta percepción de riesgo, no existe una diferencia significativa entre un diseño y el otro en ninguna de las variables, esto puede estar asociado a que la pericia, los conocimientos y las conductas adecuadas le permiten poder enfrentar un mapa u el otro con la misma destreza.
- 2) Ahora bien, cuando se compara el uso del Mapa y el Interfaz en un mismo diseño, con usuarios que presentan una alta percepción de riesgo, ninguna variable presenta una diferencia significativa cuando utilizan el mapa del SERNAGEOMIN, por lo tanto, tanto la complejidad, como relevancia no es importante en una región u otra.
- 3) Sin embargo, bajo las mismas circunstancias, en el diseño propio el número de fijaciones es constante en ambas regiones, pero la proporción de tiempo es mayor en la región del Mapa que la del interfaz. Por lo tanto, tenemos a usuarios que exploran el mapa con una misma cantidad de fijaciones, pero están más tiempo mirando la región del Mapa que la del Interfaz. Esto significa

que la región del Mapa tiene una relevancia mayor que la región del Interfaz en el diseño propio, para los usuarios con alta percepción de riesgo.

4) Para los usuarios con baja percepción de riesgo, la situación es más variada. Al comparar, primero, las diferencias entre un diseño y el otro, ocurre que, la región del Mapa presenta un mayor número de fijaciones en el diseño del SERNAGEOMIN que en el diseño propio, y a la vez una menor proporción de tiempo. Esto quiere decir que, a pesar de que el usuario está menos tiempo mirando la región del Mapa, el número de fijaciones es mayor que en el otro diseño, esto indica que lo que está mirando el usuario es más complejo. Por lo tanto, se interpreta que la región del Mapa es más compleja en el diseño del SERNAGEOMIN que en el diseño propio, para usuarios con baja percepción de riesgo.

5) Bajo las mismas circunstancias del punto anterior, al comparar, ahora la región del Interfaz, el número de fijaciones es constante, pero el tiempo es menor en el diseño propio. Por lo tanto, bajo los mismos criterios que el punto 3, se interpreta que la región del Interfaz tiene menor relevancia en el diseño propio que en el diseño del SERNAGEOMIN.

6) Ahora bien, si se compara las regiones dentro de un mismo diseño, los usuarios con poca percepción de riesgo presentan diferencias también. En el diseño del SERNAGEOMIN, la proporción de tiempo es constante, pero el número de fijaciones es mayor en el Mapa que en el Interfaz. Esto quiere decir que, aunque el usuario pase el mismo tiempo mirando una región u otra, presenta más fijaciones en el Mapa que el Interfaz, por lo tanto, es un indicador de la región del Mapa presenta mayor complejidad que la región del Interfaz en el diseño del SERNAGEOMIN, para usuarios con baja percepción de riesgo.

7) En cambio, en el diseño propio, bajo las mismas circunstancias, la proporción de tiempo es mayor en la región del Mapa que en la del Interfaz, en cambio, el número de fijaciones es menor, entonces, bajo los mismos los criterios ya establecidos, indica una menor complejidad de la región del Mapa sobre la región del Interfaz en el diseño propio, puesto que, aunque el usuario pase más tiempo mirando el Mapa, el número de fijaciones es menor, esto para usuarios con baja percepción de riesgo.

8) Sin considerar la percepción de riesgo como variable, se tienen todo tipo de variantes. Primero, fijando la región del Mapa, el diseño propio presenta una mayor proporción de tiempo y una menor

cantidad de fijaciones que el diseño del SERNAGEOMIN, esto significa que el diseño del SERNAGEOMIN presenta una mayor complejidad que el diseño propio en la región del Mapa.

9) Por otro lado, fijando la región del Interfaz, el diseño propio presenta una menor proporción de tiempo, pero la misma cantidad de fijaciones que el diseño del SERNAGEOMIN, esto implica una mayor relevancia de la región del Interfaz en el diseño del SERNAGEOMIN, en comparación del diseño propio.

10) Ahora bien, fijando el diseño propio, la proporción de tiempo es mayor en la región del Mapa que en la región del Interfaz y, además, el número de fijaciones es menor; esto implica que la región del Mapa presenta menor complejidad que la región del Interfaz.

11) Finalmente, fijando el diseño del SERNAGEOMIN, la proporción de tiempo es la misma en cada región, pero el número de fijaciones es mayor en la región del Mapa que en el Interfaz, eso quiere decir que la complejidad de la región del Mapa es mayor que la región del Interfaz.

6.5.6. Atención Visual

En el diseño propio, para los mapas de total de fijaciones (Fig. 6.22), la única interpretación palpable es que los usuarios con alta percepción de riesgo tuvieron la tendencia a leer más el texto informativo y la leyenda que los usuarios de menor percepción, en un principio, esto parece contraintuitivo si se interpreta que los usuarios de alta percepción tuvieron mayor necesidad de leer el cuadro información, pero las conclusiones acerca de la relevancia y complejidad se puede descartar esta premisa al establecer que el Interfaz tiene menor relevancia que el Mapa para usuarios con alta percepción de riesgo. Al considerar, la otra conclusión, que el Interfaz es más complejo que el Mapa para los usuarios con baja percepción de riesgo, la conclusión lógica es que los usuarios con baja percepción de riesgo encontraron muy complejo el Interfaz para motivarles su lectura.

También en una región, hacia al SW de la CONAF, donde hay un conjunto de infraestructura comerciales y habitacionales, presenta una atención visual mayor en los usuarios con alta percepción de riesgo, de esto se especula que, como el 84,6% de las personas que viven cerca del lugar (y, posiblemente visitan regularmente el Parque Nacional Villarrica) presentan una

percepción de riesgo alta, la atención puede ser explicada por la relevancia personal de mencionados usuarios.

Por otro lado, del mapa de primera y segunda fijación (Fig. 6.23) se puede concluir que los usuarios con baja percepción de riesgo presentan una mayor dispersión en la dirección de las fijaciones en comparación con los participantes de alta percepción de riesgo.

Lo que primero llamó la atención de los usuarios de alta percepción de riesgo (sin considerar la región del punto inicial) fue en dirección al ícono más cercano, es decir el ex refugio (de primer orden), y hacia las cuevas volcánicas (segundo orden) y en dirección hacia el título, Curva el Mirador y el camino de seguridad, y otros puntos (tercer orden).

Lo que primero llamó la atención de los usuarios de baja percepción de riesgo (sin considerar la región inicial), en comparación, fue además hacia el Mirador El Volcán (tercer orden), los senderos cercanos (de primer hasta tercer orden), hacia la CONAF (tercer orden) y otros puntos (tercer orden). Esta diferencia puede estar relacionada con que la pericia y conocimientos de los usuarios motiven un primer vistazo hacia zonas más claves.

Por otra parte, en el diseño del SERNAGEOMIN, del mapa de total de fijaciones (Fig. 6.24), es posible concluir que, en cambio, los usuarios con baja percepción de riesgos estuvieron más motivados a leer la leyenda y el cuadro de informaciones que los de alta. En este caso, de las conclusiones de complejidad y relevancia, es posible encontrar diferencias entre el uso del Mapa y del Interfaz en usuarios con alta percepción de riesgo. Sin embargo, en usuarios de baja percepción, el Mapa presenta una mayor complejidad que el Interfaz, esto puede motivar a los usuarios con baja percepción de riesgo a leer más los cuadros de información. Además, es posible observar que estos usuarios tienen la tendencia de mirar más las etiquetas en comparación, por lo que estos usuarios tienen una mayor necesidad de consultar la leyenda.

Del mapa de primera y segunda fijación (Fig. 6.25) también se desprende una dispersión mayor de las direcciones entre la primera y segunda fijación en usuarios con alta percepción de riesgo, en comparación con los usuarios con baja percepción de riesgo. Lo primero que llamó la atención de los usuarios con mayor percepción de riesgo (sin considerar la región de la primera fijación más relevante) fue en dirección hacia la leyenda (tercer orden), el sendero que sube al volcán (tercer orden) y el cerro Chaimillo (segundo orden). Lo primero que llamó la atención de los usuarios con menor percepción de riesgo (sin considerar la región de la primera fijación más relevante) fue, en

cambio, en dirección hacia el cráter del volcán (primer orden), a las etiquetas de caída de tefra verde (segundo orden) y morado (tercer orden), el título (tercer orden), el norte (tercer orden) y una región de peligrosidad de color naranja (tercer orden). No es posible concluir nada particular de estas diferencias.

De los mapas de saliencia visual general para todo nivel de percepción de riesgo, se compara si existen diferencias o similitudes entre un diseño u otro y, además, de las características que se pueden observar de manera particular.

Primero, de los mapas de total de fijaciones (Fig. 6.26) es posible observar la misma tendencia que tienen todos los usuarios de fijar su mirada más hacia los elementos etiquetados e íconos en cualquier mapa, incluso si están relativamente aislados del centro del gráfico; así como también de leer los títulos y textos destacados más que el cuerpo del texto; por lo tanto, una inferencia evidente es la importancia de destacar lo más relevante con estos elementos visuales. Una observación anecdótica es la tendencia a observar el cráter del volcán, aunque no presente una representación simbólica, como en el diseño propio, esto puede estar motivado por la relevancia que tiene la presencia de un volcán en una representación gráfica.

Considerando que los elementos simbólicos del diseño del mapa del SERNAGEOMIN con mayor atención visual son las etiquetas del diámetro y espesor de la caída de tefra, así como el nombre del volcán y su cráter; es posible cuestionar si lo que está comunicando el mapa del SERNAGEOMIN a la comunidad es realmente relevante. En cambio, como es esperado, los elementos que intencionalmente fueron destacados con el criterio de concisión han presentado una mayor atención en el diseño propio, aunque no es posible observar si los puntos de encuentro presentan realmente un mayor realce en comparación a los elementos de localización.

Otra observación en el diseño propio es que la flecha que apunta hacia al NE tiene una atención casi irrelevante, esto podría deberse al poco realce que tiene sobre el fondo celeste.

Por otro lado, se observa que las etiquetas de los peligros presentan una mayor atención en el diseño del SERNAGEOMIN que en el diseño propio, lo cual puede interpretarse como la mayor relevancia que tiene este elemento en un diseño que en el otro. Sin embargo, también puede deberse a sus características visuales intrínsecas (puesto que está en negrita en el diseño del SERNAGEOMIN).

Una observación final, es que la saliencia “*de fondo*” del diseño propio está disperso sobre la zona de peligros volcánicos del Zanjón Seco, levemente enfocada en los valles.

Finalmente, de los mapas de primera y segunda fijación (Fig. 6.27) es posible observar cuales fueron los elementos que primero llamaron la atención de los usuarios entre un diseño y el otro. De lo cual se clarifica que lo primero que llama la atención del mapa de SERNAGEOMIN es el cráter del volcán, y, lo segundo, la etiqueta de la isolínea de caída de tefra más cercana; en cambio, en el diseño propio es, primero, el ex refugio, como el elemento icónico más cercano, y, luego, la dirección de evacuación más cercana (hacia el punto de encuentro tras las cuevas volcánicas). Por un lado, se destaca que, en el diseño propio, ninguna dirección hacia la segunda fijación se orienta hacia la leyenda, a diferencia del diseño del SERNAGEOMIN. Por el otro, que primeras direcciones en el diseño propio caen en la zona de muy alto peligro, en cambio, del diseño del SERNAGEOMIN, tanto en zonas de peligro alto (primer orden), intermedio (segundo orden) y bajo (tercer orden). Esto puede presentar una evidencia empírica de la importancia de la escala secuencial de colores en la representación de peligros volcánicos.

6.6. Conclusiones

La hipótesis alternativa establecida en este trabajo es que el diseño del mapa simplificado presenta una mejor usabilidad que el mapa de peligro elaborado por el SERNAGEOMIN, para cada nivel de percepción de riesgo. Considerando que la usabilidad es definida en términos de la satisfacción, complejidad, relevancia y atención visual, se concluye entonces que en casi todos de los aspectos el mapa de peligro simplificado presenta, comparativamente, una mejor usabilidad:

- 1) Los usuarios con bajo nivel de percepción, lo prefieren en todos los aspectos: aprendizaje, utilidad y aficción.
- 2) La región del Mapa presenta mayor relevancia que la región del Interfaz, para usuarios con percepción de riesgo alta.
- 3) La región del Mapa presenta menor complejidad que la región del Mapa del diseño del SERNAGEOMIN, para usuarios con percepción baja. Además, la región del Interfaz presenta menor relevancia que la región del Interfaz del SERNAGEOMIN.
- 4) La región del Mapa presenta menor complejidad que la región del Interfaz, para usuarios con percepción de riesgo baja.

5) Sin considerar la percepción de riesgo como variable, las conclusiones son similares: la región del Mapa es menos compleja tanto comparada con su Interfaz, como con la región del Mapa del SERNAGEOMIN y presenta una región de Interfaz menos relevante que la región del Interfaz del SERNAGEOMIN.

6) La atención visual está en los elementos importantes, como sitios de localización y vías de evacuación.

Sin embargo:

7) El Interfaz no motiva su lectura.

8) Los puntos de encuentro no destacan especialmente por sobre los elementos de localización.

9) El símbolo de orientación no es observado por los usuarios.

10) No existe evidencia fehaciente que las zonas de peligros fuesen comunicadas mejor en un mapa que en otro. Un análisis más detallado utilizando regiones más específicas y con un instrumento de seguimiento ocular más sofisticado, o la aplicación de un estudio con enfoque *top-down*, podría dar mejor respuesta a esto.

Finalmente, los puntos a mejorar del mapa simplificado son: (1) cambiar el color de la flecha que apunta al NE. (2) Mejorar las características visuales para los puntos de encuentro. (3) Mejorar el cuadro de informaciones y leyenda para facilitar su lectura. (4) Según el comentario de un participante, añadir en la etiqueta CONAF la palabra “*entrada*” para evitar cualquier ambigüedad respecto a su significado. (5) Agregar el nombre del volcán al mapa, puesto que aunque todos los participantes asumieron desde un principio que era el volcán Villarrica por el contexto y lugar, esa información es vital en cualquier otro contexto.

7. DISCUSIONES

En este trabajo se establece la necesidad de explorar cuestiones asociadas a los actuales desafíos en la comunicación de crisis volcánica, entre éstos: el desarrollo de conocimientos relacionados a la evaluación de peligro y amenaza; el entendimiento de la incertidumbre asociada y su apropiada comunicación a usuarios objetivos, los cuales, suelen ser usuarios no especializados; y la mejora, incremento e integración de herramientas que soportan la toma de decisiones de estos usuarios. La exploración de estas cuestiones se enfoca particularmente en el caso del volcán Villarrica, por su contexto de alto riesgo.

Para avanzar respecto a estos temas se desarrollan tres tipos de herramientas: el árbol probabilístico, los productos de la evaluación de amenaza y el mapa de peligro simplificado. En este capítulo se explora y discute acerca de cómo estos productos aportan a los desafíos planteados anteriores, tanto en su desarrollo técnico, como comunicacional; y en su utilización integrada para el soporte en la toma de decisiones. Para esto se plantea un caso hipotético, del cual se simula la utilización de estas herramientas para luego inferir las ventajas y desventajas de su uso, de modo de plantear algunas consideraciones para mejorarlas en futuros trabajos.

7.1. Aplicación de un Caso Hipotético

Un lineamiento para utilizar las tres herramientas en su conjunto puede ser, por ejemplo, el siguiente caso hipotético:

Un estudio de percepción de riesgo aplicado a la comunidad que vive alrededor del volcán Villarrica informa que los habitantes de la comuna de Pucón presentan una muy baja percepción de los riesgos volcánicos, es decir, bajos conocimientos, nulas conductas de prevención y una alta ilusión de invulnerabilidad. Por lo tanto, el alcalde de Pucón ante decide realizar una campaña de concientización acerca de los peligros del volcán Villarrica orientado a los lugareños de su comuna. Esto, teniendo en cuenta que cualquier plan y gestión de emergencias también debe incluir la sociabilización hacia la comunidad para incidir en su comportamiento durante las evacuaciones. El alcalde y sus funcionarios determinan que el centro de Pucón es un sitio clave para realizar la campaña, puesto que es un centro urbano importante que tiene el potencial de reunir a muchas personas. Sin embargo, el alcalde pretende extender dicha campaña a otros sitios alrededor de la

comuna, pero no puede gestionarla en todos los sectores debido a que los recursos y el tiempo son limitados. Por lo tanto, le pide al encargado de emergencias de la municipalidad que establezca prioridades.

El primer paso es determinar el “*dónde*”, por lo tanto, una revisión del mapa de amenaza máxima promedio por entidad del volcán Villarrica (Fig. 5.23) puede entregar una visión global acerca de la amenaza en cada entidad. En este punto, se puede consultar también la tabla de amenaza promedio (Anexo 4) y mirar los ranking de la amenaza, lo que permite establecer la posición de las localidades más amenazadas de la comuna, las cuales son: Candelaria-El Mirador (posición n°6), El Claro Norte-Puerto Pucón (posición n°6), Candelaria-Monte Libre (posición n°12), El Volcán-Pasaje Arriagada, El Turbio (posición n°18), Quetroleufu-Mariano Millahual (posición n°19), El Claro-El Sol (posición n°20), El Volcán-Turbina Alta (posición n°22), Quetroleufu-Eco Parque (posición n°23), Candelaria-Calmahue (posición n°24), El Claro Norte-Ex Balsa Quelhue (posición n°26), Villa San Pedro-Villa San Pedro (posición n°27), El Claro-El Claro (posición n°28), Los Riscos-La Cascada (posición n°30), El Turbio-El Turbio (posición n°32), El Turbio-Metreñehue (posición n°33), El Turbio-Kawe Lluko (posición n°34), Candelaria-Alto Pucón (posición n°36), Candelaria-Candelaria (posición n°41) y Llafenco-Llafenco (posición n°44).

Por otra parte, el encargado le interesa también difundir la campaña a un máximo número de personas. Por lo tanto, puede seleccionar, de las entidades más amenazas, las que poseen una mayor exposición. Por ejemplo, consultando un mapa de la suma de exposición máxima por entidad (Fig. 7.1). De esto da como resultado que las dos entidades que presentan mayor exposición dentro de las entidades más amenazadas de Pucón son Quetroleufu-Mariano Millahual (posición n°19) y Candelaria-Candelaria (posición n°41).

Todo el peso de la amenaza de Quetroleufu-Mariano Millahual está determinado por una muy alta densidad poblacional, esto se puede consultar en la información censal disponible (Fig. 5.29). Pero, en una revisión del mapa de peligros volcánicos integrado (Fig. 5.6) se puede establecer que esta entidad está afectada por zonas con muy bajo grado de peligrosidad, cuyos peligros son flujos piroclásticos y caída de tefra. Además, una revisión del árbol probabilístico (Fig. 4.9-4.10) permite establecer que tan probable son que ocurran estos fenómenos en el sector, resultando en 0,09% y 5,37%, respectivamente. Por lo tanto, esta zona es prácticamente descartable a pensar de presentar un alto valor en el ranking. En cambio, Candelaria-Candelaria (posición n°41) está afectado por

zonas de bajo a moderado grado de peligrosidad relativa, cuyos peligros son flujos de lava y lahares, en el cual, el árbol probabilístico (Fig. 4.6-4.8) establece que sus probabilidades de ocurrencia son 0,32% y 13,16%, respectivamente. Por lo tanto, este sector presenta una mayor relevancia en término de la peligrosidad.

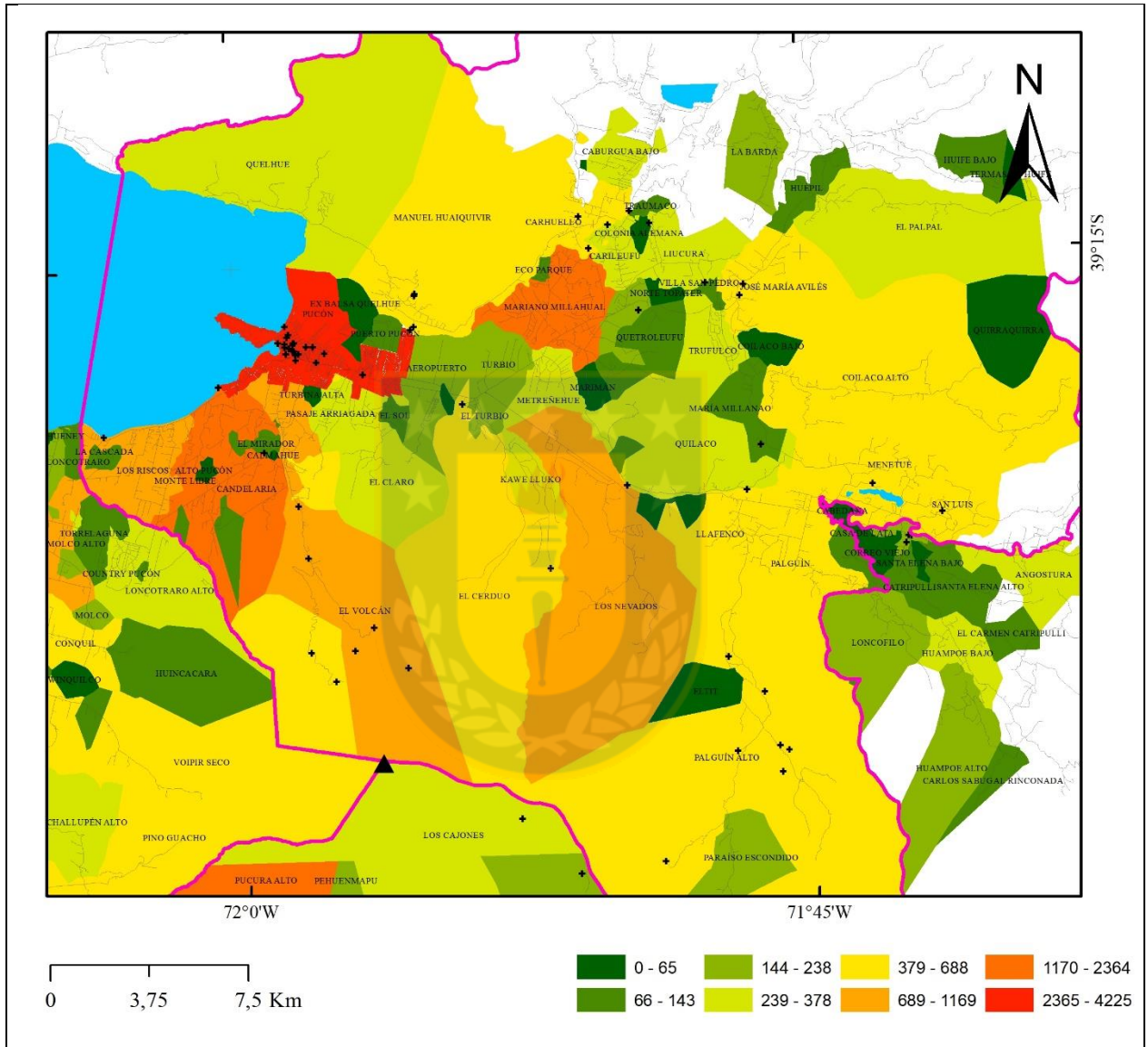


Figura 7.1: Mapa de la suma de exposición máxima por entidad de la comuna de Pucón. En la leyenda se muestra la suma de la exposición máxima por entidad. Límite comunal (línea rosada). Sitios de interés turístico (cruz negra). Rutas (línea gris). Volcán Villarrica (triángulo negro). Elaboración propia.

Finalmente, si se realiza una revisión local de la amenaza absoluta (Fig. 1 *in* Anexo 5) es posible distinguir qué sitios geográficos específicos dentro o cercanos a la entidad de Candelaria-Candelaria presentan una mayor amenaza. Por ejemplo, un punto interesante es la Escuela Básica Candelaria, sector vulnerable y muy amenazado (posición n°6) con casi un 20% de probabilidades de ser afectado por algún proceso volcánico (valor obtenido de la suma de todas las probabilidades de peligros).

Establecido el “*dónde*”, es posible determinar el “*cuándo*”, puesto que tiene que determinarse una fecha que garantice que la Escuela Básica Candelaria esté dispuesta para ser sometida a la campaña. Además, se debe considerar gestionar previamente una convocatoria a la comunidad que vive alrededor de dicha escuela para que la mayor cantidad de personas asistan a la campaña.

Para responder al “*qué*”, es decir, qué cosas se pretenden comunicar a la comunidad para influir positivamente en su percepción de riesgo, se debe considerar que el sitio presenta dificultades propias y particulares. Primero, lo más esencial es informar acerca de cómo podría impactar los peligros en la salud y sus pertenencias. Por lo tanto, mostrar apoyo audiovisual es fundamental para causar una impresión más duradera en las personas acerca de los impactos y, en consiguiente, informar acerca de qué hacer para prevenir o mitigar sus efectos; lo cual, implica, en general, seguir las indicaciones durante una evacuación y tener un kit de emergencias. En este caso, el encargado debe también revisar el estado de amenaza local también de los accesos (Fig. 7.2) para saber cómo comunicar estas cuestiones. De esto se observa que todos los accesos principales desde la escuela hacia cualquier dirección están amenazados por algún fenómeno volcánico. Por lo tanto, la Escuela Básica Candelaria tiene una alta vulnerabilidad de quedar aislada en caso de erupción. Aunque al revisar esta información con el mapa de peligros, es posible observar que entre el punto de encuentro y la escuela los fenómenos son menos recurrentes.

De las observaciones anteriores se deben establecer estrategias de cómo comunicarlas. En este trabajo también se propone que, entre las herramientas comunicacionales utilizadas en la campaña, se confeccione un mapa de peligro simplificado con un diseño orientado a la atención, ya que su usabilidad ha sido probada empíricamente. Este mapa simplificado, por lo tanto, debe focalizarse en la zona de Candelaria-Candelaria, mostrando claramente la posición de la escuela como localizador, las rutas, las vías de evacuación y puntos de encuentro de los planes de emergencia, e

informar qué tan amenazadas están aquellas rutas y qué hacer ante cualquier circunstancia; todas estas cuestiones, consideradas dentro de la metodología de la confección del mapa.



Figura 7.2: Extracción modificada del mapa de amenaza máxima del caso Escuela Básica Candelaria. El esquema de colores representa la amenaza máxima (de verde pálido, a naranja, hasta rojo en orden de magnitud). Rutas (línea gris claro). Vía de evacuación del plan de emergencia (línea verde fina). Esteros (línea celeste). Límites de entidades (línea rosada). Están localizados la escuela, puentes y el punto de encuentro con la simbología establecida en este trabajo (Fig. 6.7). Posibles vías de evacuación desde la escuela (línea verde gruesa). Corte de vías (línea verde discontinua). Elaboración propia.

7.2. Inferencias del Caso Hipotético

Realizar un ejercicio hipotético permite tener una idea general de la utilidad de las herramientas presentadas en este trabajo, tanto en su utilización como producto individual, como su utilización integrada. De este modo es posible inferir cuales son las ventajas y desventajas en su uso, y poder plantear alternativas de cómo mejorarlos en futuros trabajos.

En el caso hipotético se pudo identificar, dentro de una de las comunas, un sitio concreto que presenta circunstancia de amenaza interesantes. Esto refleja que los productos de este trabajo tienen el potencial para poder buscar escenarios particulares (como la situación de la escuela) desde un planteamiento global. En las conclusiones del capítulo 5, también se determinó como los productos

de amenaza permiten su utilización para evaluar las rutas de evacuación. Es decir, desde casos particulares se pueden obtener conclusiones más globales acerca de la accesibilidad de un sector.

Por otra parte, es posible establecer como cada producto generado en este trabajo tiene su rol particular y esencial en el procedimiento de su utilización integrada.

Particularmente, el formato de árbol probabilístico facilita la comunicación de probabilidades y se integra bien con otros productos. Un ejemplo ya explorado en el capítulo 6 fue su utilización para generar las frecuencias naturales del texto de la leyenda en el mapa simplificado. En el caso hipotético fue posible su consulta directa conociendo la zona de afectación de un peligro desde su mapa.

Una de las desventajas fue que los productos de exposición elaborados en este trabajo no solucionaban el problema planteado. Por lo tanto, se tuvo la necesidad de confeccionar también un mapa de la suma de la exposición máxima por entidad, con una escala 1:200.000, para resolver el caso hipotético de manera más eficiente.

Otra dificultad detectada, aunque prevista en las discusiones del capítulo 5, es que la evaluación de la amenaza promedio por entidad tiene problemas para comunicar la información con eficacia, por ejemplo: la entidad Candelaria-Candelaria (posición n°41) engloba a entidades más pequeñas, como Candelaria-El Mirador (posición n°6), lo cual es una situación difícil de explicar. También influye que el tamaño de la entidad tiene una influencia en el grado de amenaza promedio calculado. Por tanto, siempre debe considerarse consultar las variaciones de amenaza dentro de una misma entidad, para ello, gráficos de amenaza absoluta, como la de Pucón (Fig. 5.25), son herramientas que pueden resultar útil para comunicar la incertidumbre, puesto que, visualmente, es posible observar la amenaza máxima y mínima absoluta, y la proporción de sitios amenazados dentro de la entidad. El gráfico de amenaza promedio (Fig. 5.24) presenta la misma desventaja que su formato en mapa o en tabla, al presentar información con una alta incertidumbre. La tabla de amenaza promedio, sin embargo, tiene la ventaja que informa también el valor máximo y mínimo de amenaza absoluta y su desviación estándar, información que puede ser útil para interpretar más correctamente el valor de la amenaza promedio en dicha entidad. Finalmente, la utilización de muchos productos en formatos diferentes no es tan eficiente para resolver problemas, por lo tanto, realizar formatos que integren los árboles probabilísticos y la evaluación de amenaza de este trabajo son necesarios para proporcionar una mejor comunicación.

7.3. Propuestas y Consideraciones Finales

El mapa de amenaza promedio puede ser presentado con otros formatos, por ejemplo, un mapa de amenaza por localidad (Fig. 7.3), el cual es menos complejo que el de por entidades, porque ya no existen entidades grandes que engloban a más pequeñas y tiene una cantidad considerablemente menor de polígonos (87 localidades). Esto hace más factible la creación de gráficos de amenaza absoluta para cada localidad. Además, a este mapa (escala 1:300.000) se le agrega los trazos de los nodos definidos para el árbol probabilístico para facilitar el uso integrado entre ambos productos.

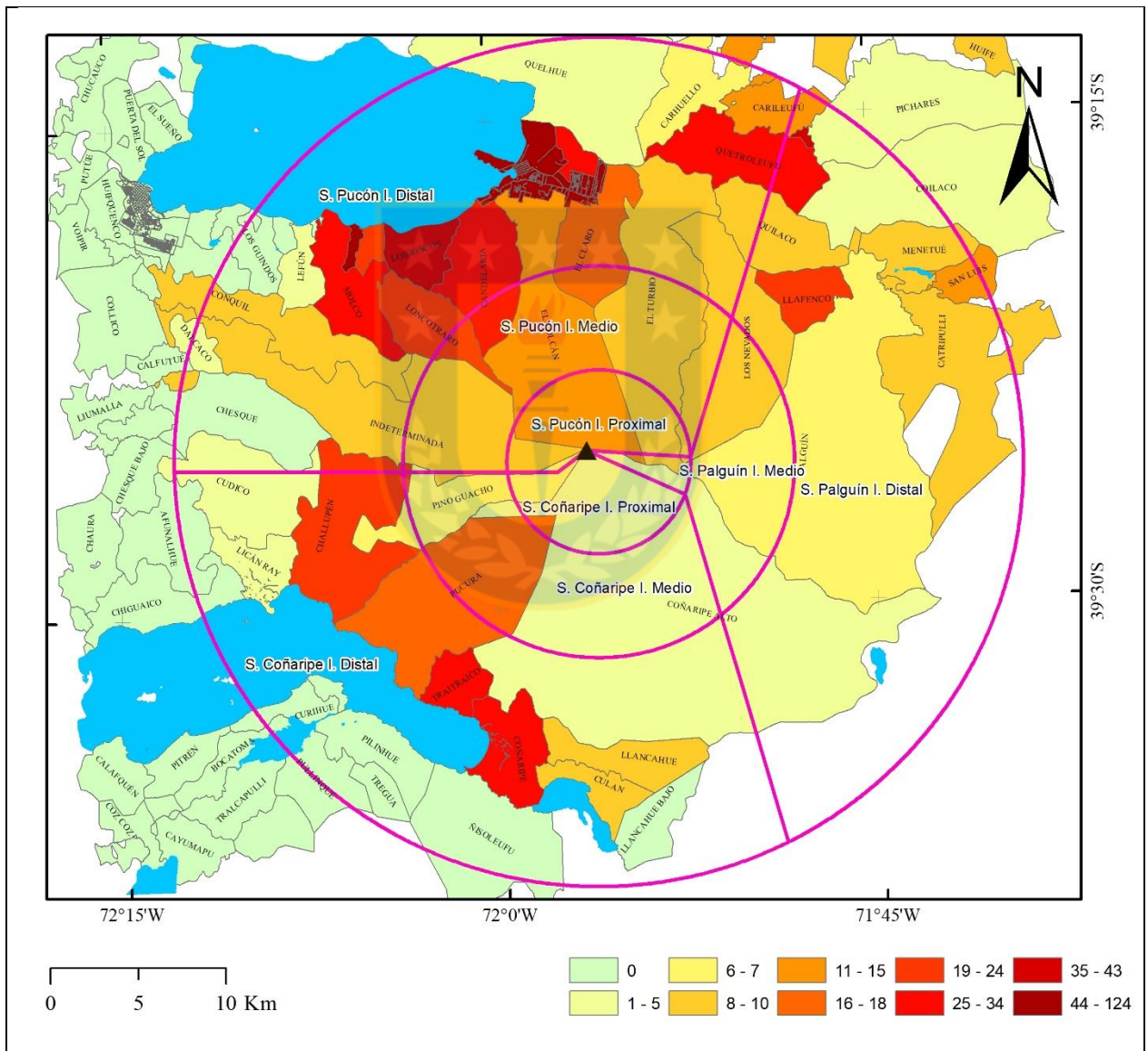


Figura 7.3: Mapa de amenaza máxima promedio por localidad. La leyenda representa el grado de amenaza. La línea rosada representa los límites de los nodos del árbol probabilístico. Cráter (triángulo negro). Elaboración propia.

Otra manera de integrar la evaluación de la amenaza con el árbol probabilístico es calculando la amenaza promedio por nodo del árbol probabilístico (Fig. 7.4) o también presentado la información de la suma de la exposición máxima por nodo del árbol probabilístico (Fig. 7.5).

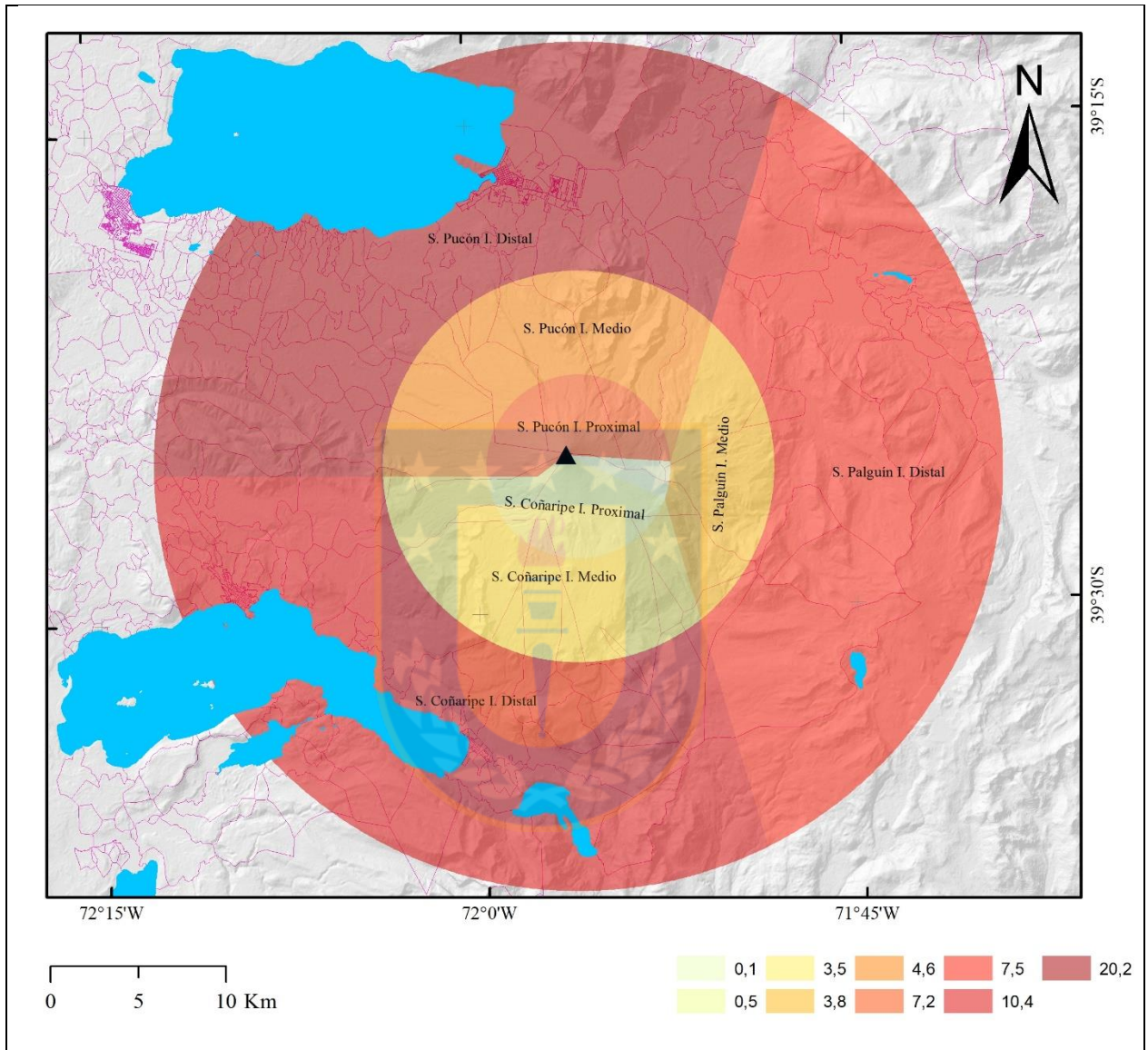


Figura 7.4: Mapa de amenaza máxima promedio por nodo del árbol probabilístico. La leyenda representa el grado de amenaza. La línea rosada representa los límites de las entidades. Elaboración propia.

Estos nuevos formatos presentan la información con otro tipo de características visuales que, incluso, pueden usarse como herramienta comunicacional para la comunidad, puesto que son representaciones infográficas sencillas e intuitivas. Además, también permite la posibilidad para establecer un nuevo nodo para el árbol probabilístico, uno que responda al problema de: “¿qué tan

probable es que una persona sea dañada o muerta por un fenómeno volcánico determinado con una orientación y alcance de impacto determinado, si la erupción está en curso?”. Esto último requiere de un análisis más exhaustivo. Sin embargo, *a priori*, una mayor amenaza o exposición en un sector, implica una mayor probabilidad que una persona pueda ser impactada por un peligro volcánico.

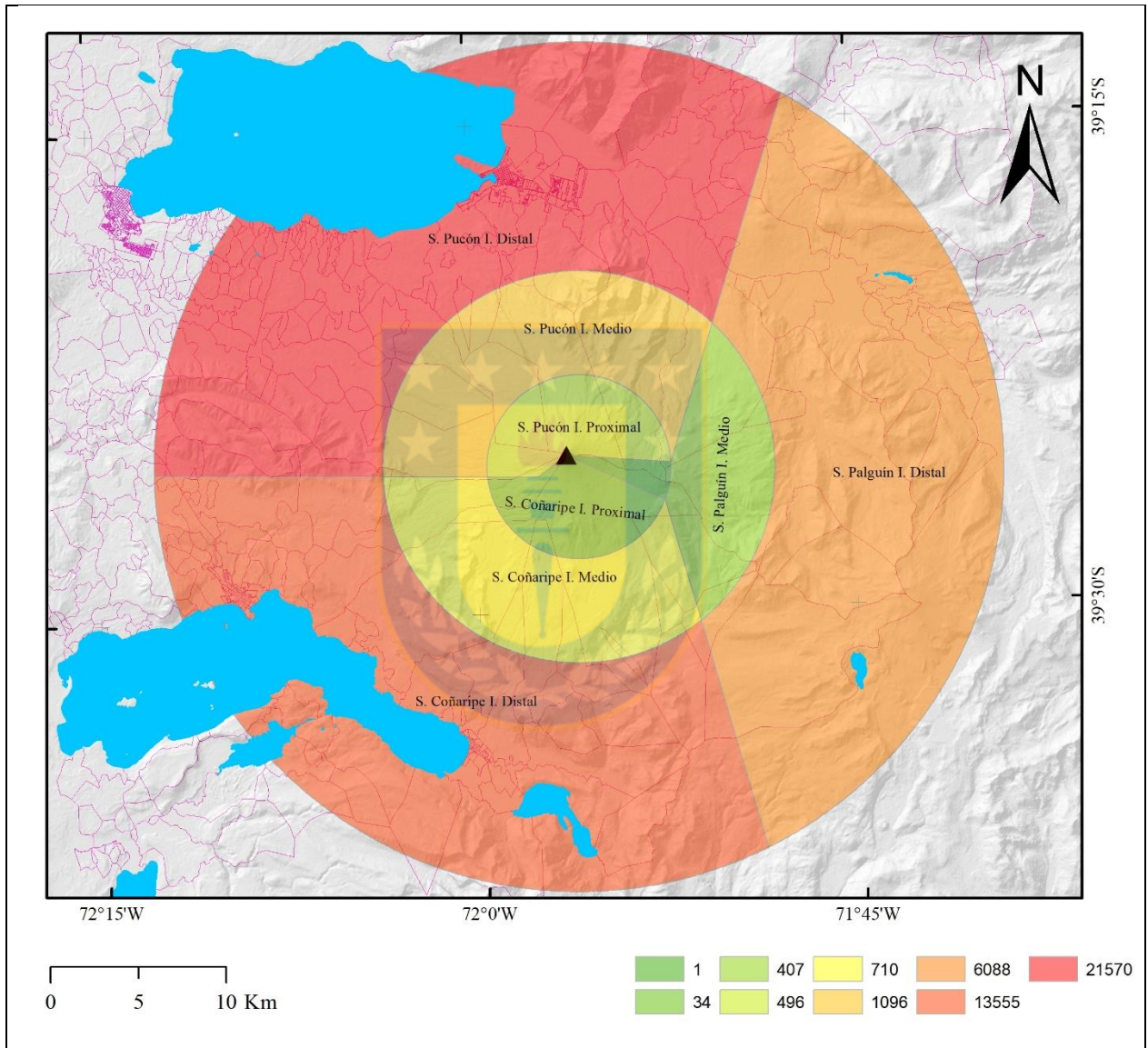


Figura 7.5: Mapa de suma de exposición máxima por nodo del árbol probabilístico. La leyenda representa el grado de exposición. La línea rosada representa los límites de las entidades. Elaboración propia.

La exposición es una variable más intuitiva para comenzar a plantear los lineamientos para este tipo de análisis. Por ejemplo, empezando con intersecar individualmente cada escenario de peligro

de Jorquera (2018), Álvarez (2020) y Arias (2020) con los nodos de sector e impacto, y calculando por cada zona resultante la suma de la exposición dividido por la cantidad de cuadros de la malla de 100 x 100. Esto podría proporcionar una estimación de la probabilidad del nodo para cada peligro en cada sector y alcance. De ese ejemplo, asumiendo que toda la zona proximal es impactada por proyectiles balísticos, entonces, el sector Pucón tiene un 4,60% de probabilidad de que una persona sea dañada o muerta por un proyectil, dado que la erupción esté en curso. En cambio, el sector Palguín, 0,07% y Coñaripe 0,49%. Profundizar acerca de cómo realizar estas estimaciones probabilísticas de exposición y amenaza considerando un tratamiento estadístico más sofisticado podrían ser realizado en futuros trabajos.



8. CONCLUSIONES

La esencia de este trabajo es generar productos para la comunicación y su utilización por parte de usuarios no especializados, en este caso para la gestión y planificación de emergencias volcánicas, que sirvan para salvaguardar la salud y vida de las comunidades aledañas y mejorar sus percepciones de riesgo en cuestiones relacionadas a los peligros volcánicos; esto en el contexto particular del volcán Villarrica. Es decir, el fin es aportar herramientas para la prevención, como generar medidas de mitigación y preparación (o mejorarlas), de modo que también mejore la respuesta de la comunidad en caso de erupción. Para esto se plantean objetivos considerando los desafíos planteados por la actual comunidad volcanológica en asuntos relacionados con las crisis volcánicas.

Así, del primer objetivo específico, se determina la probabilidad de ocurrencia y zonas de afectación de diferentes fenómenos volcánicos a través de la confección de un probabilístico del volcán Villarrica (Fig. 4.6-4.10), el cual fue elaborado de manera que responda a las necesidades de los funcionarios a cargo de planes de gestión y emergencia. Por lo tanto, responde a asuntos prácticos acerca de qué fenómenos volcánicos ocurren, por dónde se extienden y con qué frecuencia, dejando afuera cuestiones de interés técnico. El árbol probabilístico presenta soluciones a problemáticas relacionadas con el pronóstico de peligros volcánicos, el cual tiene como ventaja el tratamiento y comunicación de la incertidumbre de una erupción que se asume en curso, a través de la visualización estructurada de una combinación de diversos escenarios y sus probabilidades de ocurrencia. Además, el árbol probabilístico es un producto fácil de integrar con otros mapas del volcán Villarrica, puesto que se confeccionan los nodos de sector e impacto asociados a una región geográfica alrededor del volcán. Su integración fue efectiva desde el caso hipotético con el mapa de amenaza volcánica (subcapítulo 7.2) y con el mapa de peligro simplificado (subcapítulo 6.2). Un ejemplo de su utilización puede ser que un funcionario de la CONAF consulte la zona de impacto medio en el sector de Pucón, donde está ubicado la entrada del Parque Nacional Villarrica sector Rucapillán y revisar las probabilidades condicionales de lahares (71%), flujos de lava (27%) y caída de tefra (27%). Esto puede ser un insumo para la toma de decisiones en caso que de establecer protocolos internos en casos de emergencia o generar medidas de mitigación en el Parque. No se conocen antecedentes del uso de árboles probabilísticos por parte de funcionarios encargados de emergencias volcánicas en Chile. Por lo tanto, se espera que el desarrollo de éste en

particular abra la posibilidad de su uso en la toma de decisiones en la gestión y planificación de emergencias.

Del segundo objetivo específico, se cuantifica la amenaza volcánica alrededor del volcán Villarrica a través de la confección de una base de datos de población e infraestructura en las comunas de Pucón, Villarrica y Panguipulli, y se integran con evaluaciones existentes del peligro volcánico. De esto se elaboran productos como mapas globales (Fig. 2.23) y locales (Anexo 5), una tabla (Tabla 1 *in* Anexo 4) y gráficos de amenaza volcánica (Fig. 5.24-5.25). Incidentalmente, también son elaborados mapas globales (Fig. 5.16) y locales (Anexo 3), y gráficos de exposición (Fig. 5.18-5.21). Los productos han sido elaborados para su uso directo por parte de funcionarios a cargo de planes y gestiones de emergencias e, incidentalmente, también por parte de la comunidad. La evaluación de amenaza de este trabajo aporta sobre el conocimiento local de la amenaza del volcán Villarrica, para su fácil replicación e integración con otras evaluaciones de peligro y riesgo, y en otros volcanes. De la utilización de estos productos en un caso hipotético y del análisis de la situación de amenaza de las vías de evacuaciones, se pudo comprobar la utilidad de estos productos de manera individual e integrado con otras herramientas para solucionar problemas tanto particulares, como globales. Esto es posible, puesto que se puede obtener conclusiones generales de accesibilidad desde la interpretación de características de amenaza locales; y obtener desde la exploración global de amenaza las características de amenaza de un sitio particular. De las inferencias del caso hipotético se diseñan otros productos: como un mapa de exposición mejorado (Fig. 7.1) y otro integrado con los nodos del árbol probabilístico (Fig. 7.5); así como también mapas integrados de la amenaza con los nodos del árbol probabilístico con diferentes formatos (Fig. 7.3-7.4) que aportan diferentes enfoques de utilización. Siguiendo con el mismo ejemplo, un funcionario de CONAF puede consultar el mapa de amenaza máxima por localidad (Fig. 7.3), el cual es un insumo que le permite conocer la situación de amenaza de los diferentes sectores del Parque Nacional Villarrica para poder determinar prioridades en la asignación de recursos humanos o económicos, siendo el orden de las localidades más amenazadas: El Volcán (11-15), El Turbio y Los Nevados (8-10), Palguín y Pino Huacho (6-7) y Coñaripe Alto (1-5). También puede consultar el mapa de amenaza máxima del sector El Volcán (Fig. 6 *in* Anexo 5) y evaluar el estado de amenaza de puntos de encuentro, vías de evacuación y otros sitios importantes. Por ejemplo, puede determinar que el acceso al punto de encuentro tras las cuevas volcánicas presenta una amenaza por la posibilidad de ser afectado por el paso de lahares desde el estero Nalcadero. Actualmente,

los funcionarios encargados de emergencias volcánicas utilizan los mapas de peligro elaborados por SERNAGEOMIN, quienes requieren de la asesoría constante de los profesionales técnicos. Por lo tanto, se espera que estos productos abran la posibilidad de su uso también en la toma de decisiones, sin necesidad de requerir asesorías externas. Aunque, para futuros trabajos, es necesario probar empíricamente la efectividad de estos productos como, por ejemplo, aplicando un estudio de usabilidad mediante el uso de tecnología de seguimiento ocular con un enfoque *top-down* a funcionarios de la ONEMI o de municipalidades locales.

Del tercer y último objetivo específico, se evalúa la usabilidad de un mapa de peligro simplificado del volcán Villarrica como herramienta de comunicación que integra los peligros e información de planes de emergencias utilizando métodos empíricos, en este caso mediante el uso de tecnología de seguimiento ocular. El mapa de peligro simplificado se elabora para su uso por parte de la comunidad para incidir en su percepción de riesgo y facilitar los procesos de gestión de planes de emergencias ya establecidos. Fue necesario comparar el mapa simplificado con el mapa oficial de peligro volcánico del Villarrica elaborado por SERNAGEOMIN, el cual, a pesar de que posiblemente no ha sido diseñado para su uso por parte de la comunidad, éste es el único publicado libre y gratuitamente para ser descargado y consultado por cualquier usuario. De la evaluación, tanto considerando la percepción de riesgo de los usuarios como no, se concluye que la usabilidad del mapa de peligro simplificado, en términos generales, resulta favorable en comparación, respecto a: la satisfacción de los usuarios, la relevancia del mapa sobre el interfaz, y la menor complejidad de su uso. También resultan favorables las características de atención visual, donde efectivamente la saliencia visual sobre los elementos importantes resulta en una mayor atención por parte de los usuarios. Siguiendo el mismo ejemplo, el funcionario de la CONAF puede hacer uso del mapa de peligro simplificado de la entrada del Parque Nacional Villarrica (Fig. 6.11) para la difusión de los peligros y planes de emergencias dentro del recinto. Éste podría ser entregado impreso en folletos a los visitantes o ser puesto en un panel informativo a la entrada. Se espera que este estudio permita la posibilidad de la elaboración y uso de mapas simplificados de peligro volcánico específicos para comunicar acerca de los peligros y planes de emergencia en Chile, usando los lineamientos de un diseño orientado a la atención, considerando siempre las necesidades específicas de la comunidad y procurando conseguir una buena comunicación, tanto desde las autoridades hacia las comunidades, así como desde las comunidades hacia las autoridades.

9. REFERENCIAS

- ALVÁREZ, 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 (inédito): 167 pp. Concepción.
- ANDREASTUTI, S.; PARIPURNO, E.; GUNAWAN, H.; BUDIANTO, A.; SYAHBANA, D. & PALLISTER, J. 2017. Character of community response to volcanic crises at Sinabung and Kelud volcanoes. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* Vol.: 13 pp.
- 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 (inédito): 181 pp. Concepción.
- BAXTER, M.D.; BERNSTEIN, S. & BUIST, S. 1986. Preventive health measures in volcanic eruptions. *American Journal of Public Health.* Vol. **76**: 84-90.
- BAXTER, P.J. & HORWELL, C.J. 2015. Impacts of eruptions on human health. *The Encyclopedia of Volcanoes* (Sigurdsson, H.; Houghton, B.; McNutt, S.; Rymer, H. & Stix, J.). Academic Press: 1456 pp. New York.
- BERTIN, D.; AMIGO, A. & BERTIN, L. 2015. Erupción del volcán Villarrica 2015: productos emitidos y volumen involucrado. Congreso Geológico Chileno N°14. Actas, Tomo **3**: 249-252. La Serena.
- BLONG, R.J. 1984. Hazards produced by volcanic eruptions. *Volcanic Hazards: a source book on the effects of eruptions.* Academic Press: 424 pp. Orlando.
- CALDER, E.S.; WAGNER, K. & OGBURN, S.E. 2015. Volcanic hazard maps. *Global Volcanic Hazards and Risk* (Loughlin, S.C.; Sparks, S.; Brown, S.K.; Jenkins, S.F.; Vye-Brown, C.). Cambridge University Press (inédito): 789 pp. Cambridge.
- CALDERÓN, R. 2017. Caracterización sociocultural de la percepción de riesgo en áreas rurales del volcán Villarrica. Tesis para optar al Grado de Máster en Geografía y Geomática. Pontificia Universidad Católica de Chile, Instituto de Geografía (inédito): 87 pp. Santiago.

- CASERTANO, L. 1964. Actividad del volcán Villarrica en el curso de este siglo. Editorial Universitaria: 16 pp. Santiago.
- CASTRUCCIO, A., CLAVERO, J. & RIVERA, A. 2010. Comparative study of lahars generated by 1961 and 1971 eruptions of Calbuco and Villarrica volcanoes, Southern Andes of Chile. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* Vol. **190**: 297-311.
- CLAVERO, J. & MORENO, H. 2004. Evolution of Villarrica volcano. Villarrica volcano (39,5°S), Southern Andes, Chile (Lara, L. & Clavero, J.). Boletín Servicio Nacional de Geología y Minería N°61: 74 pp. Santiago.
- COLE, P.D.; NERI, A. & BAXTER, P.J. 2015. Hazards from pyroclastic density currents. The Encyclopedia of Volcanoes (Sigurdsson, H.; Houghton, B.; McNutt, S.; Rymer, H. & Stix, J.). Academic Press: 1456 pp. New York.
- CONNOR, C.; BEBBINGTON, M. & MARZOCCHI, W. 2015. Probabilistic volcanic hazard assessment. The Encyclopedia of Volcanoes (Sigurdsson, H.; Houghton, B.; McNutt, S.; Rymer, H. & Stix, J.). Academic Press: 1456 pp. New York.
- CORWIN, K.A. 2016. Living in lahar zones: assessing hazard exposure, risk perception, and preparedness behaviors in communities within the mount baker and glacier peak volcanic hazard zones. Tesis para optar al Grado de Máster en Ciencias Geológicas. Boise State University, Department of Geosciences (inédito): 180 pp. Boise.
- DUCHOWSKI, A. T. 2017. Eye Tracking Methodology: Theory and Practice. Springer International Publishing: 366 pp. Cham.
- DUFEK, J.; ONGARO, T.E. & ROCHE, O. 2015. Pyroclastic density currents: processes and models. The Encyclopedia of Volcanoes (Sigurdsson, H.; Houghton, B.; McNutt, S.; Rymer, H. & Stix, J.). Academic Press: 1456 pp. New York.
- DZIERMA, Y. & WEHRMANN, H. 2010. Eruption time series statistically examined: probabilities of future eruptions at Villarrica and Llaima volcanoes, Southern Volcanic Zone, Chile. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* Vol. **193**: 82-92.
- EWERT, J.W.; DIEFENBACH, A.K. & RAMSEY, D.W. 2018. 2018 Update to the U.S. Geological Survey national volcanic threat assessment. Scientific Investigations Report 2018–5140: 40 pp. Reston.

FEARNLEY, C.J.; WINSON, A.E.G.; PALLISTER, J. & TILLING, R. 2018. Volcano crisis communication: challenges and solutions in the 21st century. *Observing the Volcano World: Volcano Crisis Communication* (Fearnley, C.J.; Bird, D.K.; Haynes, K.; McGuire W.J. & Jolly, G.). Springer Open: 771 pp. Barcelona.

FITZGERALD, R.H.; KENNEDY, B.M.; WILSON T.M.; LEONARD, G.S.; TSUNEMATSU, K. & KEYS, H. 2018. The communication and risk management of volcanic ballistic hazards. *Observing the Volcano World: Volcano Crisis Communication* (Fearnley, C.J.; Bird, D.K.; Haynes, K.; McGuire W.J. & Jolly, G.). Springer Open: 771 pp. Barcelona.

FLORES, F. 2014. Análisis cuantitativo del riesgo de inundación por lahares en el volcán Villarrica: métodos integrados de peligro y vulnerabilidad para la ciudad de Pucón, centro sur de Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología (inédito): 183 pp. Santiago de Chile.

FOURNIER D'ALBE, E.M. 1979. Objectives of volcanic monitoring and prediction. *Journal of the Geological Society*. Vol. **136**: 321-326.

GUDMUNDSSON, M.T. 2015. Hazards from lahars and jökulhlaups. *The Encyclopedia of Volcanoes* (Sigurdsson, H.; Houghton, B.; McNutt, S.; Rymer, H. & Stix, J.). Academic Press: 1456 pp. New York.

HARRIS, A.J.L. 2015. Basaltic lava flow hazard. *Volcanic Hazards, Risks and Disasters* (Shroder, J.F. & Papale, P.). Elsevier: 532 pp. Oxford.

HARROWER, M. & BREWER, C.A. 2003. Colorbrewer.org: an online tool for selecting color schemes for maps. *Cartogr. J.* Vol. **40**: 27-37.

HAYNES, K.; BARCLAY, J. & PIDGEON, N. 2007. Volcanic hazard communication using maps: an evaluation of their effectiveness. *Bull. Volcanol.* Vol. **70**: 123-138.

HEGARTY, M.; CANHAM, M.S. & FABRIKANT, S.I. 2010. Thinking about the weather: how display salience and knowledge affect performance in a graphic inference task. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*. Vol. **36**: 37-53.

JENNY, H.; JENNY, B. & HURNI, L. 2010. Interactive design of 3D maps with progressive projection. *Cartogr. J.* Vol. **47**: 211-221.

- JOERIN, J.; SHAW, R.; TAKEUCHI, Y. & KRISHNAMURTHY, R. 2012. Assessing community resilience to climate-related disasters in Chennai, India. *Int. J. Disast. Risk. Re.* Vol. 1: 44-54.
- 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 Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra (inédito): 187 pp. Concepción.
- KILBURN, C.R.J. 2015. Lava flow hazards and modeling. *The Encyclopedia of Volcanoes* (Sigurdsson, H.; Houghton, B.; McNutt, S.; Rymer, H. & Stix, J.). Academic Press: 1456 pp. New York.
- LARA, L.E. 2004. Chain: tectonic constraints for volcanism in a transversal alignment. Villarrica volcano (39.5°S). Villarrica volcano (39,5°S), Southern Andes, Chile (Lara, L. & Clavero, J.). *Boletín Servicio Nacional de Geología y Minería* N°61: 74 pp. Santiago.
- LARA, L.E.; CLAVERO, J.; HINOJOSA, M.; HUERTA, S.; WALL, R. & MORENO, H. 2006. NVEWS-Chile: sistema de clasificación semicuantitativa de la vulnerabilidad volcánica. Congreso Geológico Chileno N°11. Actas 2: 487-490. Antofagasta.
- LAVIGNE, F.; MORIN, J.; MEL, E.T.W.; CALDER, E.S.; USAMAH, M. & NUGROHO, U. 2018. Mapping hazard zones, rapid warning communication and understanding communities: primary ways to mitigate pyroclastic flow hazard. *Observing the Volcano World: Volcano Crisis Communication* (Fearnley, C.J.; Bird, D.K.; Haynes, K.; McGuire W.J. & Jolly, G.). Springer Open: 771 pp. Barcelona.
- LECHNER, P.; TUPPER, A.; GUFFANTI, M.; LOUGHLIN, S. & CASADEVALL, T. 2018. Volcanic ash and aviation – the challenges of real-time, global communication of a natural hazard. *Observing the Volcano World: Volcano Crisis Communication* (Fearnley, C.J.; Bird, D.K.; Haynes, K.; McGuire W.J. & Jolly, G.). Springer Open: 771 pp. Barcelona.
- LOHMAR, S.; ROBIN, C.; GOURGAUD, A.; CLAVERO, J.; PARADA, M.A.; MORENO, H.; ERSOY, O.; LÓPEZ-ESCOBAR, L. & NARANJO, J.A. 2007. Evidence of magma-water interaction during the 13,800 years BP explosive cycle of the Licán Ignimbrite, Villarrica volcano (southern Chile). *Revista Geológica de Chile*. Vol. 34: 233-247.
- MARTÍ, J. 2017. Assessing volcanic hazard: a review. *Oxford Handbooks Online*. Vol.: 73 pp.

- MARZOCCHI, W.; SANDRI, L.; GASPARINI, P.; NEWHALL, C. & BOSCHI, E. 2004. Quantifying probabilities of volcanic events: the example of volcanic hazard at Mount Vesuvius. *Journal of Geophysical Research*. Vol. **109**: B11201.
- MARZOCCHI, W.; SANDRI, L. & FURLAN, C. 2006. A quantitative model for volcanic hazard assessment. *Statistics in Volcanology* (Mader, H.M.; Coles, S.G.; Connor, C.B. & Connor, L.J.). Geological Society: 285 pp. London.
- MARZOCCHI, W.; SANDRI, L. & SELVA, J. 2008. BET_EF: a probabilistic tool for long- and short-term eruption forecasting. *Bull. Volcanol.* Vol. **70**: 623–632.
- MARZOCCHI, W.; SANDRI, L. & SELVA, J. 2010. BET_VH: a probabilistic tool for long-term volcanic hazard assessment. *Bull. Volcanol.* Vol. **72**: 705-716.
- MORENO, H. 2000. Mapa de peligros del volcán Villarrica, regiones de La Araucanía y de Los Lagos. Servicio Nacional de Geología y Minería, Documento de Trabajo N°17 (1:75.000). Santiago.
- MORENO, H. & CLAVERO, J. 2006. Geología del volcán Villarrica, regiones de La Araucanía y de Los Lagos. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica N°96 (1:50.000). Santiago.
- MOTHES, P.A. & VALLANCE, J.W. 2015. Lahars at Cotopaxi and Tungurahua volcanoes, Ecuador: highlights from stratigraphy and observational records and related downstream hazards. *Volcanic Hazards, Risks and Disasters* (Shroder, J.F. & Papale, P.). Elsevier: 532 pp. Oxford.
- MUNIZAGA, F.; HERVE, F.; DRAKE, R.; PANKHURST, R.J.; BROOK, M. & SNELLING, N. 1988. Geochronology of the lake region of south-central Chile (39°-42°): preliminary results. *Journal of South American Earth Sciences*. Vol. **1**: 309-316.
- NAVE, R.; ISAIA, R.; VILARDO, G. & BARCLAY, J. 2010. Re-assessing volcanic hazard maps for improving volcanic risk communication: application to Stromboli Island, Italy. *Journal of Maps*. Vol. **6**: 260-269.
- NARANJO, J.A. & MORENO, H. 2004. Laharic debris-flows from Villarrica volcano. Villarrica volcano (39.5 S), Southern Andes, Chile (Lara, L. & Clavero, J.). *Boletín Servicio Nacional de Geología y Minería*. N° 61: 74 pp. Santiago.

- NARANJO, J.A. 2015. Nuevo estilo eruptivo del volcán Villarrica: 3 de marzo 2015. 2015. Congreso Geológico Chileno N°14. Actas, Tomo 3: 230-232. La Serena.
- NEWHALL, C.G. & HOBLITT, R.P. 2002. Constructing event trees for volcanic crises. *Bull. Volcanol.* Vol. **64**: 3-20.
- NEWHALL, C.G. & PALLISTER, J.S. 2015. Using multiple data sets to populate probabilistic volcanic event trees. *Volcanic Hazards, Risks and Disasters* (Shroder, J.F. & Papale, P.). Elsevier: 532 pp. Oxford.
- PÉREZ, D. 2012. Metodología para la gestión del riesgo volcánico. Informe de Práctica Profesional para optar al Título de Geógrafo. Pontificia Universidad de Católica de Chile, Instituto de Geografía (inédito): 55 pp. Santiago.
- PETIT-BREUILH, M.E. 1994. Contribución al conocimiento de la cronología eruptiva histórica del volcán Villarrica (39°25'S), 1558-1985. *Revista Frontera.* Vol. **13**: 71-85. Temuco.
- PETROVIC, D. & MASERA, P. 2006. Analysis of user's response on 3D cartographic presentations. Proceedings of ICA Mountain Cartography Workshop N°5. Actas: 171-179. Bohinj.
- PREPPERNAU, C.A. & JENNY, B. 2015. Three-dimensional versus conventional volcanic hazard maps. *Nat Hazards.* Vol. **78**: 1329-1347.
- RETCHLESS, D.P. 2014. Sea level rise maps: how individual differences complicate the cartographic communication of an uncertain climate change hazard. *Cartographic Perspectives.* Vol. **77**: 5-20.
- SAVAGE, D.M.; WIEBE, E.N. & DEVINE, H.A. 2004. Performance of 2D versus 3D topographic representations for different task types. *Proc. Hum. Factors Ergon. Soc. Annu. Meet.* Vol. **48**: 1793-1797.
- SCHOBESBERGER, D. & PATTERSON, T. 2008. Evaluating the effectiveness of 2D vs. 3D trailhead maps. Proceedings of ICA Mountain Cartography Workshop N°6. Actas: 201-206. Lenk.
- SANDRI, L.; GUIDOBONI, E.; MARZOCCHI, W. & SELVA, J. 2009. Bayesian event tree for eruption forecasting (BET_EF) at Vesuvius, Italy: a retrospective forward application to the 1631 eruption. *Bull. Volcanol.* Vol. **71**: 729-745.

- SCOTT, W.E. 1993. Los peligros volcánicos. Los Peligros Volcánicos (Tilling R.I. & Beate, B.). World Organization of Volcano Observatories: 125 pp. Nuevo México.
- SEVERTSON, D.J. & VATOVEC, C. 2012. The theory-based influence of map features on risk beliefs: self-reports of what is seen and understood for maps depicting an environmental health hazard. *Journal of Health Communication*. Vol. **17**: 836-856.
- SOBRADELO, R. & MARTÍ, J. 2010. Bayesian event tree for long-term volcanic hazard assessment: application to Teide-Pico Viejo stratovolcanoes, Tenerife, Canary Islands. *Journal of Geophysical Research*. Vol. **115**: B05206.
- SOBRADELO, R.; BARTOLINI, S. & MARTÍ, J. 2014. HASSET: a probability event tree tool to evaluate future volcanic scenarios using Bayesian inference. *Bull. Volcanol.* Vol. **76**: 770-774.
- SCHMIDT, J.; MATCHAM, I.; REESE, S.; KING, A.; BELL, R.; HENDERSON, R.; SMART, G., COUSINS, J.; SMITH, W. & HERON, D. 2011. Quantitative multi-risk analysis for natural hazards: a framework for multi-risk modelling. *Nat Hazards*. Vol. **58**: 1169-1192.
- STEWART, C.; WILSON, M.; SWORD-DANIELS, V.; WALLACE, K.L.; MAGILL, C.R.; HORWELL, C.J.; LEONARD, G.S. & BAXTER, P.J. 2018. Communication demands of volcanic ashfall events. *Observing the Volcano World: Volcano Crisis Communication* (Fearnley, C.; Bird, D.K.; Haynes, K.; McGuire W.J. & Jolly, G.). Springer Open: 771 pp. Barcelona.
- SWIENTY, O.; REICHENBACHER, T.; REPPERMUND, S. & ZIHL, J. 2008. The role of relevance and cognition in attention-guiding geo-visualization. *Cartogr. J.* Vol. **45**: 227-238.
- THOMPSON, M.A.; LINDSAY, J.M. & GAILLARD, J.C. 2015. The influence of probabilistic volcanic hazard map properties on hazard communication. *J. Appl. Volcanol.* Vol. **4**: 1-24.
- THOMPSON, M.A.; LINDSAY, J.M. & LEONARD, G.S. 2018. More than meets the eye: volcanic hazard map design and visual communication. *Observing the Volcano World: Volcano Crisis Communication* (Fearnley, C.J.; Bird, D.K.; Haynes, K.; McGuire W.J. & Jolly, G.). Springer Open: 771 pp. Barcelona.
- TILLING, R.I. 2005. Volcano hazards. *Volcanoes and the Environment* (Martí, J. & Ernst, G.). Cambridge University Press: 471 pp. New York.

- TONINI, R.; SANDRI, L. & THOMPSON, M.A. 2015. PyBetVH: a python tool for probabilistic volcanic hazard assessment and for generation of Bayesian hazard curves and maps. *Computers & Geosciences*. Vol. **79**: 38-46.
- VALLANCE, J.W. & IVERSON, R.M. 2015. Lahars and their deposits. The Encyclopedia of Volcanoes (Sigurdsson, H.; Houghton, B.; McNutt, S.; Rymer, H. & Stix, J.). Academic Press: 1456 pp. New York.
- VAN DAELE, M.; MOERNAUT, J.; SILVERSMIT, G.; SCHMIDT, S.; FONTIJN, K.; HEIRMAN, K.; VANDOORNE, W.; DE CLERCQ, M.; VAN ACKER, J.; WOLFF, C.; PINO, M.; URRUTIA, R.; ROBERTS, S.J.; VINCZE, L. & DE BATIST, M. 2014. The 600 yr eruptive history of Villarrica Volcano (Chile) revealed by annually laminated lake sediments. *Geological Society of America Bulletin*. Vol. **126**: 481-498.
- VERA, F. 2018. Origen, transporte y emplazamiento de lahares y avalanchas mixtas generadas en la erupción del 03 de marzo de 2015 en el volcán Villarrica, regiones de la Araucanía y los Ríos, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra (inédito): 189 pp. Concepción.
- VOßKÜHLER, A.; NORDMEIER, V.; KUCHINKE, L. & JACOBS, A.M. 2008. OGAMA (open gaze and mouse analyzer): open-source software designed to analyze eye and mouse movements in slideshow study designs. *Behavior Research Methods*. Vol. **40**: 1150-1162.
- WEISS, K.; GIRANDOLA, F. & COLBEAU-JUSTIN, L. 2011. Protection behaviors with regard to natural hazards: from resistance to commitment. *Pratiques Psychologiques*. Vol. **17**: 251-262.
- WIEBE, E.; SKYKHUIS, D.A. & SAVAGE, D. 2005. Answering questions with 2D and 3D topographic maps: use of eye tracking to understand representational reasoning. NARST 2005 Annual Meeting. Actas: 1-5. Dallas.
- WITHAM, C.S. 2005. Volcanic disasters and incidents: a new database. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* Vol. **148**: 191-233.
- WRIGHT, H.; PALLISTER, J.; MCCAUSLAND, W.; GRISWOLD, J.; ANDREASTUTI, S.; BUDIANTO, A.; PRIMULYANA, S. & GUNAWAN, H. 2018. Construction of probabilistic event trees for eruption forecasting at Sinabung volcano, Indonesia 2013–14. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* Vol.: 20 pp.



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
DEPARTAMENTO CIENCIAS DE LA TIERRA



ANEXOS



Memoria para optar al Título de Geólogo

Alfredo Antonio Rivas Vergara

Profesor Patrocinante : Dr. José Luis Palma Lizana

Profesores Comisión : Dr. Óscar Enrique Figueroa Arriagada
Dr. Jorge Andrés Quezada Flory

CONCEPCIÓN, 2019

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo	Página
I Base de datos del registro histórico del volcán Villarrica para la confección del árbol probabilístico.....	229
II Base de datos de turismo y servicios para el análisis de exposición del volcán Villarrica.....	251
III Mapas de detalle de la exposición poblacional máxima y mínima del volcán Villarrica.....	270
IV Base de datos de la amenaza máxima y mínima del volcán Villarrica.....	280
V Mapas de detalle de la amenaza máxima del volcán Villarrica.....	293
VI Material utilizado para el estudio de usabilidad incorporando tecnología de seguimiento ocular.....	299
VII Mapas de atención visual para el análisis de seguimiento ocular.....	301
VIII Otros mapas de peligro o evacuación del volcán Villarrica.....	307



ANEXO I: BASE DE DATOS DEL REGISTRO HISTÓRICO DEL VOLCÁN VILLARRICA PARA LA CONFECCIÓN DEL ÁRBOL PROBABILÍSTICO

Tabla 1: Actividad eruptiva histórica del volcán Villarrica. Recolección desde diversas fuentes bibliográficas de las erupciones históricas y sus IEV. Los eventos de Van Daele *et al.* (2014) comienzan desde el año donde son hallados registros de ambos lagos a la vez. En fondo gris se destaca los registros que son seleccionados para este trabajo.

Van Daele <i>et al.</i> (2014)		Dzierma & Wehrmann (2010)		Petit-Breulih (1994)		Este trabajo	
Año	IEV	Año	IEV	Año	IEV	Año	IEV
1523	≥2						
1526	≥2						
1537	≥2						
1538	≥2						
1539	≥2						
1543	≥2						
1553	≥2						
1558	≥2	1558	2	1558	2	1558	2
1562	≥2	1562	2	1562	2	1562	2
1564	≥2						
1576	≥2						
1579	≥2						
1582	≥2						
1584	≥2						
1594	≥2	1594	2	1594	1		
1600	≥2						
1604	≥2						
1610	≥2						
1612	≥2						
1617	≥2						
1625	≥2						
1632	≥2						
1638	≥2						
1640	≥2			1640	3	1640	3
1642	≥2						
1645	≥2						
1647	≥2	1647	1	1647	1	1647	2

Tabla 1 (continuación): Actividad eruptiva histórica del volcán Villarrica.

Van Daele <i>et al.</i> (2014)		Dzierma & Wehrmann (2010)		Petit-Breulih (1994)		Este trabajo	
		1657	1	1657	1		
1669	≥2						
1672	≥2						
1675	≥2						
1682	≥2						
1688	≥2	1688	1	1688	1-2	1688	2
1705	≥2						
1708	≥2						
1709	≥2						
1715	≥2						
1716	≥2	1716	1	1716	1	1716	2
1721	≥2						
1730	≥2	1730	2	1730	2	1730	2
1737	≥2	1737	2	1737	2	1737	2
1742	≥2	1742	2	1742	2	1742	2
		1745	1	1745	1?		
1751	≥2	1751	1	1751	1	1751	2
1759	≥2	1759	1	1759	1		
1761	≥2						
1767	≥2						
1771	≥2						
1775	≥2	1775	2				
		1777	1	1777	1		
1780	≥2	1780	1	1780	0-1		
1787	≥2	1787	2	1787	0-1	1787	2
		1790	1	1790	1-2		
				1792	1-2		
				1796	1-2		
1798	≥2						
				1799	1-2		
				1801	1-2		
1806	≥2	1806	2	1806	2	1806	2
1815	≥2	1815	1	1815	2	1815	2

Tabla 1 (continuación): Actividad eruptiva histórica del volcán Villarrica.

Van Daele <i>et al.</i> (2014)		Dzierma & Wehrmann (2010)		Petit-Breulih (1994)		Este trabajo	
1822	≥2	1822	2	1822	2	1822	2
1826	≥2						
1832	≥2	1832	2	1832	2	1832	2
1836	≥2						
1837	≥2	1837	2	1837	2	1837	2
1841	≥2						
1850	≥2						
1852	≥2						
1853	≥2	1853	2	1853	2	1853	2
		1859	2	1859	2		
		1864	2	1864	2		
1869	≥2	1869	2	1869	2	1869	2
1871	≥2						
1874	≥2	1874	2	1874	0-1		
		1875	2	1875	2		
1877	≥2	1877	2	1877	2	1877	2
1879	≥2	1879	2	1879	2	1879	2
1880	≥2	1880	2				
1883	≥2	1883	2	1883	2	1883	2
1890	≥2						
1893	≥2	1893	2	1893	2	1893	2
1897	≥2	1897	2	1897	2	1897	2
1902	≥2						
1904	≥2	1904	2	1904	2	1904	2
1906	≥2	1906	2	1906	1		
		1907	2	1907	2	1907	2
1908	≥2	1908	2	1908	2	1908	2
1909	≥2	1909	2	1909	2	1909	2
1915	≥2	1915	1	1915	1		
1920	≥2	1920	2	1920	2	1920	2
		1921	2	1921	1-2	1921	2
1922	≥2	1922	2				
1927	≥2	1927	2				

Tabla 1 (continuación): Actividad eruptiva histórica del volcán Villarrica.

Van Daele <i>et al.</i> (2014)		Dzierma & Wehrmann (2010)		Petit-Breulih (1994)		Este trabajo	
		1929	1	1929	1		
1933	≥2	1933	2	1933	1-2	1933	2
		1935	1	1935	1		
1938	≥2	1938	2	1938	1	1938	2
		1947	1				
1948	≥2	1948	2-3	1948	3	1948	3
		1956	1				
		1958	1	1958	1		
		1960	1				
		1961	1				
1963	≥2	1963	3	1963	0-2	1963	2
1964	≥2	1964	2	1964	2	1964	2
1971	≥2	1971	2	1971	2	1971	2
		1977	1	1977	1		
1980	≥2	1980	2	1980	1		
		1983	1	1983	1		
1984	2	1984	2	1984	0-2	1984	2
1991	2	1991	2				
		1992	1				
		1994	1				
		1995	1				
		1996	1				
		1996	1				
		1998	1				
		2003	1				
		2004	1				
		2008	1				
						2015	2

Tabla 2: Detalle por fenómenos volcánicos de la actividad eruptiva histórica del volcán Villarrica. Detalle de las características de los eventos históricos subdivido en fenómeno volcánico. En la columna erupción, se destaca en negrita el año de la erupción, el cual es utilizado como etiqueta identitaria del evento, además se añade si la fecha está comprendida dentro de una temporada seca o húmeda. Obtenido de [1] Bertin *et al.* (2015), [2] Naranjo (2015), [3] Vera (2018), [4] Petit-Breuilh (1994), [5] Van Daele *et al.* (2014), [6] Flores (2014), [7] Moreno & Clavero (2006), [8] Lara (2004), [9] Naranjo & Moreno (2004) y [10] Castruccio *et al.* (2010).

Erupción	Caída de tefra	Proyectiles balísticos	Lahares	Flujos de lava	Flujos piroclásticos
03-03- 2015 (temporada seca)	Columna 6 km [1] Columna 8-10 km, 7km E [2] Hasta 100 km E [3]	Radio 3-4 km [1]	Pedregoso, Turbio, Zanjón Seco y Correntoso. Inundaciones destructivas en CONAF, centro de esquí, cuevas volcánicas, alta capacidad de carga hasta 10 km (ej. El Cerdúo), inundaciones >10 km (ej. corte de puente en la confluencia de Turbio y Pedregoso) [1]	Clastogénica N, E y SW 450 m [3]	Alcance entre 0,5 a 2 km, hasta 3,5 km [2]
30-10- 1984 a 18-11-1985 (principalmente temporada seca)	Columna 3 km [4] Columna 600-3.000 m [8]	Presencia [4]		Fisura sur, Correntoso cota 1400, Pedregoso, aumento del caudal [4] Pedregoso 3,8 km, D: 1,2 km. Candelaria 5,5 km, D: 1,5 km [6] NNE, Correntoso, Pedregoso [7]	

Tabla 2 (continuación): Detalle por fenómenos volcánicos de la actividad eruptiva histórica del volcán Villarrica.

Erupción	Caída de tefra	Proyectiles balísticos	Lahares	Flujos de lava	Flujos piroclásticos
29-10- 1971 a 10- 01-1972 (temporada seca)	Columna 3 km [4] Columna 3.000 m [8]	Presencia [4]	NE, N, W, SW, aumento del caudal, destrucción puentes en Turbio, Carmelito, Correntoso y Chaillupén [4] Lago Villarrica y Calafquén [5] Destrucción de todos los puentes y formación de delta en lago Villarrica [9] Extensas inundaciones en lago Calafquén [10]	Chaillupén cota 2000, Pedregoso 6 km [4] Chaillupén, 16,5 km, D: 2,1-6,8 km. Pedregoso 3,8- 6 km, D: 1,2-2,3 km [6] Pedregoso 6 km y Chaillupén 16,5 km [7]	
02-03- 1964 a 03- 03-1964 (temporada seca)	Presencia [4] Columna 1.500 m [8]	Presencia [4]	Cuatro lahares entre Villarrica y Pucón, S (destruyó Coñaripe, y afectó Chaillupén), aumento de caudal [4] Lago Villarrica y Calafquén [5] Destruyó parcialmente la localidad de Coñaripe [7]	Presencia [4] Diuco, 6 km, D: 5,4 km [6]	

Tabla 2 (continuación): Detalle por fenómenos volcánicos de la actividad eruptiva histórica del volcán Villarrica.

Erupción	Caída de tefra	Proyectiles balísticos	Lahares	Flujos de lava	Flujos piroclásticos
08-03-1963 a 25-05-1963 (principalmente temporada húmeda)	Columna 1,5 km. Afectó Pucón [4] NNE [7] Columna 500-1.000 m [8]	Presencia [4]	Chaillupén, aumento de caudal N [4] Lago Villarrica y Calafquén [5] Se cortó el camino entre Villarrica y Pucón [7]	Fisura SW, Chaillupén 1 km [4]	
31-01-1949 a 01-01-1949 (temporada seca)	Columna 8 km [4] Columna >8.000 m [8]	Presencia [4]	Correntoso, Turbio, Voipir y Chaillupén destruyendo infraestructura, destrucción de puente a 15 km, llegando al lago cerca de la ciudad Lago Villarrica y Calafquén [5]	NW 10 km. Molco 12-15 km, D: 1,3 km [6] Rellenó parcialmente el valle de Molco, alcance 15 km [7]	W (Correntoso), pocos km [7]
18-10-1948 a 25-12-1948 (principalmente temporada seca)	Columna 300 m [4]	Presencia [4]	Turbio, Zanjón Seco, Correntoso, Molco, Huichatio, Chaillupén, Voipir. Aumento del caudal [4] Lago Villarrica y Calafquén [5]	Molco 300 m, Chaillupén [4]	
1938	¿Presencia? [4] Columna >1.000 m [8]	¿Presencia? [4]	Lago Calafquén [5]		

Tabla 2 (continuación): Detalle por fenómenos volcánicos de la actividad eruptiva histórica del volcán Villarrica.

Erupción	Caída de tefra	Proyectiles balísticos	Lahares	Flujos de lava	Flujos piroclásticos
05-01- 1933 (temporada seca)	¿Presencia? [4] Columna >1.000 m [8]	Presencia [4]			
19-12- 1921 (temporada seca)	Presencia [4]	Presencia [4]		Llega a Coñaripe [4]	
10-12- 1920 a 13-12-1920 (temporada seca)	Presencia [4] Columna >2.000 m [8]	Presencia [4]	Turbio, Molco, Huichatio, Voipir. Daño sobre puente en Llafenco en el río Pucón [4] Lago Villarrica [5]	Presencia [4]	
19-08- 1909 (temporada húmeda)	Presencia [4] Columna >3.000 m [8]	Presencia [4]	Zanjón Seco-Carmelito (Candelaria) Lago Villarrica [5]	¿Presencia? [4]	
31-10- 1908 a 12-1908 (temporada seca)	Columna 3 km [4] Columna 3.000 m [8]	Presencia [4]	Turbio-Pedregoso, Zanjón Seco (hasta Pucón), Molco, Correntoso, Huichatio y Chaillupén [4] Lago Villarrica [5]	Presencia [4]	
10-05- 1907 a 26-05-1907 (temporada húmeda)	Hacia Palguín, varios km [4] Columna >3.000 m [8]	Presencia [4]			

Tabla 2 (continuación): Detalle por fenómenos volcánicos de la actividad eruptiva histórica del volcán Villarrica.

Erupción	Caída de tefra	Proyectiles balísticos	Lahares	Flujos de lava	Flujos piroclásticos
1904	¿Presencia? [4] Columna 1.000 m [8]	Presencia [4]	Turbio-Pedregoso, Zanjón Seco, Correntoso, Molco, Chaillupén [4] Lago Villarrica [5]		
1897	Presencia [4] Columna >1.000 m [8]	Presencia [4]	Lago Villarrica [5]	¿Presencia? [4]	
1893	¿Presencia? [4] Columna >1.000 m [8]	¿Presencia? [4]	Lago Villarrica y Calafquén [5]		
1883	Presencia [4] Columna 1.000 m [8]	Presencia [4]			
02-02- 1879 (temporada seca)	Presencia [4] Columna 1.000 m [8]	Presencia [4]	Lago Villarrica [5]		
12-05- 1877 (temporada húmeda)	¿Presencia? [4] Columna >1.000 m [8]	¿Presencia? [4]			
02- 1869 (temporada seca)	Presencia [4]	Presencia [4]			

Tabla 2 (continuación): Detalle por fenómenos volcánicos de la actividad eruptiva histórica del volcán Villarrica.

Erupción	Caída de tefra	Proyectiles balísticos	Lahares	Flujos de lava	Flujos piroclásticos
11-1853 (temporada seca)	Presencia [4] Lago Villarrica [5]	Presencia [4]		Presencia [4]	
07-11-1837 a 21-11-1837 (temporada seca)	Presencia [4] Columna >1.000 m [8]	Presencia [4]			
24-12-1832 (temporada seca)	SE [4] Columna >1.000 m [8]	Presencia [4]			
19-11-1822 (temporada seca)	Presencia [4] Columna >2.000 m [8]	Presencia [4]	Lago Villarrica y Calafquén [5]		
1815	Presencia [4] Columna <1.000 m [8]	Presencia [4]			
1806	¿Presencia? [4] Columna 1.000 m [8]	¿Presencia? [4]	Lago Villarrica [5]		
1787	Lago Calafquén [5] Columna <1.000 m [8]	Presencia [4]	Lago Villarrica [5]	A Pucón, hasta Zanjón Seco [4] Zanjón Seco 13 km, D: 1,1 km [6]	

Tabla 2 (continuación): Detalle por fenómenos volcánicos de la actividad eruptiva histórica del volcán Villarrica.

Erupción	Caída de tefra	Proyectiles balísticos	Lahares	Flujos de lava	Flujos piroclásticos
14-12- 1751 (temporada seca)	Presencia [4]	Presencia [4]	Lago Villarrica [5]	Presencia [4]	
1742	Presencia [4]	Presencia [4]			
24-12- 1737 (temporada seca)	¿Presencia? [4] Lago Calafquén [5]	¿Presencia? [4]			
08-07- 1730 (temporada húmeda)	¿Presencia? [4]	¿Presencia? [4]	Lago Villarrica y Calafquén [5]		
1716	Presencia [4] Lago Calafquén [5]	Presencia [4]	Lago Villarrica [5]	¿Presencia? [4]	
1688	Presencia [4]	Presencia [4]	Presencia [4] Lago Villarrica y Calafquén [5]		
13-05- 1647 (temporada húmeda)	Presencia [4] Lago Calafquén [5]	Presencia [4]	Lago Villarrica [5]		
03-02- 1640 (temporada seca)	Presencia [4]	Presencia [4]	Obstrucción de cauces de los ríos [4] Lago Villarrica y Calafquén [5]	Presencia [4]	

Tabla 2 (continuación): Detalle por fenómenos volcánicos de la actividad eruptiva histórica del volcán Villarrica.

Erupción	Caída de tefra	Proyectiles balísticos	Lahares	Flujos de lava	Flujos piroclásticos
1562 (temporada seca)	195 km NNW [4] Columna >3.000 m [8]	Presencia [4]	Lago Villarrica [5]		
1558	Presencia [4] Lago Villarrica y Calafquén [5] Columna >2.000 m [8]	Presencia [4]			



Tabla 3 (continuación): Base de datos organizada y seleccionada de lahares en el registro histórico del volcán Villarrica.

AÑO	ERUPCIÓN												
	LAHARES												
	S. PUCÓN			S. COÑARIPE			S. PALGUÍN						
			P	M	D		P	M	D		P	M	D
1742	X	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1737	X	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1730	X	X	X	X	X	.	X	X	.	.	.	.	.
1716	X	X	X	X	X	.	.	.	.	.	.	.	.
1688	X	X	X	X	X	.	X	X	X	.	.	.	.
1647	X	X	X	X	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1640	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	.	.	.
1562	X	X	X	X	X	.	.	.	.	.	.	.	.
1558	X	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.



Tabla 4: Base de datos organizada y seleccionada de flujos de lava en el registro histórico del volcán Villarrica.

Se organiza la información según los nodos definidos para la confección del árbol probabilístico. En X se marca la ocurrencia y características del evento, y en punto la no ocurrencia. P: zona de impacto proximal. M: zona de impacto medio. D: zona de impacto distal.

AÑO	ERUPCIÓN													
	FLUJOS DE LAVA													
	S. PUCÓN			S. COÑARIPE			S. PALGUÍN							
			P	M	D		P	M	D		P	M	D	
2015	X	X	X	X	.	.	X	X	.	.	.	.	.	.
1984	X	X	X	X	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1971	X	X	X	X	.	.	X	X	X	X	.	.	.	.
1964	X	X	.	.	.	.	X	X	.	.	.	.	.	.
1963	X	X	.	.	.	.	X	X	.	.	.	.	.	.
1949	X	X	X	X	X	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1948	X	X	X	X	.	.	X	X	.	.	.	.	.	.
1938	X	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1933	X	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1921	X	X	.	.	.	.	X	X	X	X	.	.	.	.
1920	X	X	X	X	.	.	X	X	.	.	.	.	.	.
1909	X	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1908	X	X	X	X	.	.	X	X	.	.	.	.	.	.
1907	X	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1904	X	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1897	X	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1893	X	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1883	X	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1879	X	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1877	X	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1869	X	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1853	X	X	X	X	.	.	X	X	.	.	.	.	.	.
1837	X	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1832	X	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1822	X	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1815	X	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1806	X	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1787	X	X	X	X	X	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1751	X	X	X	X	.	.	X	X	.	.	.	.	.	.

Tabla 4 (continuación): Base de datos organizada y seleccionada de flujos de lava en el registro histórico del volcán Villarrica.

AÑO	ERUPCIÓN												
	LAHARES												
	S. PUCÓN			S. COÑARIPE			S. PALGUÍN						
			P	M	D		P	M	D		P	M	D
1742	X	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1737	X	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1730	X	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1716	X	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1688	X	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1647	X	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1640	X	X	X	X	X	.	X	X	X	.	.	.	.
1562	X	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1558	X	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.



Tabla 5: Base de datos organizada y seleccionada de caída de tefra en el registro histórico del volcán Villarrica.

Se organiza la información según los nodos definidos para la confección del árbol probabilístico. En X se marca la ocurrencia y características del evento, y en punto la no ocurrencia. P: zona de impacto proximal. M: zona de impacto medio. D: zona de impacto distal.

AÑO	ERUPCIÓN													
	CAÍDA DE TEFRA													
	S. PUCÓN			S. COÑARIPE			S. PALGUÍN							
			P	M	D		P	M	D		P	M	D	
2015	X	X	.	.	.	.	.	.	.	.	X	.	.	.
1984	X	X	.	.	.	.	.	.	.	.	X	.	.	.
1971	X	X	.	.	.	.	.	.	.	.	X	.	.	.
1964	X	X	.	.	.	.	.	.	.	.	X	.	.	.
1963	X	X	X	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1949	X	X	.	.	.	.	.	.	.	.	X	.	.	.
1948	X	X	.	.	.	.	.	.	.	.	X	.	.	.
1938	X	X	.	.	.	.	.	.	.	.	X	.	.	.
1933	X	X	.	.	.	.	.	.	.	.	X	.	.	.
1921	X	X	.	.	.	.	.	.	.	.	X	.	.	.
1920	X	X	.	.	.	.	.	.	.	.	X	.	.	.
1909	X	X	.	.	.	.	.	.	.	.	X	.	.	.
1908	X	X	.	.	.	.	.	.	.	.	X	.	.	.
1907	X	X	.	.	.	.	.	.	.	.	X	.	.	.
1904	X	X	.	.	.	.	.	.	.	.	X	.	.	.
1897	X	X	.	.	.	.	.	.	.	.	X	.	.	.
1893	X	X	.	.	.	.	.	.	.	.	X	.	.	.
1883	X	X	.	.	.	.	.	.	.	.	X	.	.	.
1879	X	X	.	.	.	.	.	.	.	.	X	.	.	.
1877	X	X	.	.	.	.	.	.	.	.	X	.	.	.
1869	X	X	.	.	.	.	.	.	.	.	X	.	.	.
1853	X	X	X	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1837	X	X	.	.	.	.	.	.	.	.	X	.	.	.
1832	X	X	.	.	.	.	.	.	.	.	X	.	.	.
1822	X	X	.	.	.	.	.	.	.	.	X	.	.	.
1815	X	X	.	.	.	.	.	.	.	.	X	.	.	.
1806	X	X	.	.	.	.	.	.	.	.	X	.	.	.
1787	X	X	.	.	.	.	X	.	.	.	.	.	.	.
1751	X	X	.	.	.	.	.	.	.	.	X	.	.	.

Tabla 5 (continuación): Base de datos organizada y seleccionada de caída de tefra en el registro histórico del volcán Villarrica.

AÑO	ERUPCIÓN													
	CAÍDA DE TEFRA													
	S. PUCÓN			S. COÑARIPE			S. PALGUÍN							
			P	M	D		P	M	D		P	M	D	
1742	X	X	.	.	.	.	.	.	.	.	X	.	.	.
1737	X	X	.	.	.	.	X	.	.	.	.	.	.	.
1730	X	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1716	X	X	.	.	.	.	X	.	.	.	.	.	.	.
1688	X	X	.	.	.	.	.	.	.	.	X	.	.	.
1647	X	X	.	.	.	.	X	.	.	.	.	.	.	.
1640	X	X	.	.	.	.	.	.	.	.	X	.	.	.
1562	X	X	X	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1558	X	X	X	.	.	.	X	.	.	.	.	.	.	.



Tabla 6: Base de datos organizada y seleccionada de proyectiles balísticos en el registro histórico del volcán Villarrica. Se organiza la información según los nodos definidos para la confección del árbol probabilístico. En X se marca la ocurrencia y características del evento, y en punto la no ocurrencia. P: zona de impacto proximal. M: zona de impacto medio. D: zona de impacto distal.

AÑO	ERUPCIÓN													
	PROYECTILES BALÍSTICOS													
	S. PUCÓN			S. COÑARIPE			S. PALGUÍN							
			P	M	D		P	M	D		P	M	D	
2015	X	X	X	X	.	.	X	X	.	.	X	X	.	.
1984	X	X	X	X	.	.	X	X	.	.	X	X	.	.
1971	X	X	X	X	.	.	X	X	.	.	X	X	.	.
1964	X	X	X	X	.	.	X	X	.	.	X	X	.	.
1963	X	X	X	X	.	.	X	X	.	.	X	X	.	.
1949	X	X	X	X	.	.	X	X	.	.	X	X	.	.
1948	X	X	X	X	.	.	X	X	.	.	X	X	.	.
1938	X	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1933	X	X	X	X	.	.	X	X	.	.	X	X	.	.
1921	X	X	X	X	.	.	X	X	.	.	X	X	.	.
1920	X	X	X	X	.	.	X	X	.	.	X	X	.	.
1909	X	X	X	X	.	.	X	X	.	.	X	X	.	.
1908	X	X	X	X	.	.	X	X	.	.	X	X	.	.
1907	X	X	X	X	.	.	X	X	.	.	X	X	.	.
1904	X	X	X	X	.	.	X	X	.	.	X	X	.	.
1897	X	X	X	X	.	.	X	X	.	.	X	X	.	.
1893	X	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1883	X	X	X	X	.	.	X	X	.	.	X	X	.	.
1879	X	X	X	X	.	.	X	X	.	.	X	X	.	.
1877	X	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1869	X	X	X	X	.	.	X	X	.	.	X	X	.	.
1853	X	X	X	X	.	.	X	X	.	.	X	X	.	.
1837	X	X	X	X	.	.	X	X	.	.	X	X	.	.
1832	X	X	X	X	.	.	X	X	.	.	X	X	.	.
1822	X	X	X	X	.	.	X	X	.	.	X	X	.	.
1815	X	X	X	X	.	.	X	X	.	.	X	X	.	.
1806	X	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1787	X	X	X	X	.	.	X	X	.	.	X	X	.	.
1751	X	X	X	X	.	.	X	X	.	.	X	X	.	.

Tabla 6 (continuación): Base de datos organizada y seleccionada de proyectiles balísticos en el registro histórico del volcán Villarrica.

AÑO	ERUPCIÓN													
	PROYECTILES BALÍSTICOS													
	S. PUCÓN			S. COÑARIPE			S. PALGUÍN							
			P	M	D		P	M	D		P	M	D	
1742	X	X	X	X	.	.	X	X	.	.	X	X	.	.
1737	X	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1730	X	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1716	X	X	X	X	.	.	X	X	.	.	X	X	.	.
1688	X	X	X	X	.	.	X	X	.	.	X	X	.	.
1647	X	X	X	X	.	.	X	X	.	.	X	X	.	.
1640	X	X	X	X	.	.	X	X	.	.	X	X	.	.
1562	X	X	X	X	.	.	X	X	.	.	X	X	.	.
1558	X	X	X	X	.	.	X	X	.	.	X	X	.	.



ANEXO II: BASE DE DATOS DE TURISMO Y SERVICIOS PARA EL ANÁLISIS DE EXPOSICIÓN DEL VOLCÁN VILLARRICA

Tabla 1: Llegadas de turista en las comunas de Pucón. Se organiza las llegadas de turistas en establecimientos de alojamiento turístico desde enero de 2009 hasta mayo de 2019. Obtenido de información disponible en el INE. Se debe considerar que la metodología entre 2009 a 2014, entre 2015 a junio de 2017 y entre julio 2017 al actual, son diferentes, por lo cual no son valores compatibles entre sí para tratamientos estadísticos.

PUCÓN	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2009	19.800	15.177	5.038	4.041	3.003	2.206	6.036	3.114	4.162	4.680	6.565	7.264
2010	19.672	21.192	2.060	3.050	3.560	2.747	5.951	3.769	4.791	5.517	6.127	7.239
2011	19.643	22.019	6.320	4.202	2.435	2.973	7.001	3.978	4.884	5.480	6.450	6.448
2012	20.579	21.571	6.001	5.764	3.259	3.336	7.699	4.445	7.096	5.510	6.981	7.205
2013	22.906	25.640	9.941	4.752	4.389	3.513	8.946	5.513	6.551	5.484	7.413	8.254
2014	24.258	31.257	7.987	5.727	4.745	3.328	8.411	5.294	6.239	6.268	7.218	8.378
2015	29.840	31.059	9.170	5.970	5.699	5.972	13.725	7.808	9.491	11.721	15.002	16.757
2016	28.744	30.871	16.307	8.426	5.609	7.927	15.943	9.201	9.234	14.010	12.428	15.046
2017	28.898	26.901	14.593	10.351	7.439	6.128	19.740	12.391	12.696	15.056	18.541	17.051
2018	36.654	45.585	17.134	12.905	11.318	10.429	17.128	10.678	12.588	12.201	15.733	17.802
2019	24.322	33.309	12.139	9.783	8.970							

Tabla 2: Llegadas de turista en las comunas de Villarrica. Se organiza las llegadas de turistas en establecimientos de alojamiento turístico desde enero de 2009 hasta mayo de 2019. Obtenido de información disponible en el INE. Se debe considerar que la metodología entre 2009 a 2014, entre 2015 a junio de 2017 y entre julio 2017 al actual, son diferentes, por lo cual no son valores compatibles entre sí para tratamientos estadísticos.

VILLARRICA	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2009	12.558	12.933	1.929	1.986	1.362	1.366	1.931	1.557	1.615	1.916	2.237	5.040
2010	12.878	13.943	644	1.218	1.278	1.051	2.027	1.401	1.865	2.196	2.272	3.721
2011	11.757	14.051	2.214	1.443	894	924	1.429	1.579	1.573	2.274	2.179	2.550
2012	13.441	17.817	3.181	3.041	1.667	1.818	3.855	1.430	2.497	2.377	2.981	3.646
2013	14.096	16.456	3.394	1.616	1.363	1.001	2.124	1.853	3.237	2.629	3.993	2.922
2014	15.760	17.926	2.504	2.007	1.503	1.087	2.516	1.930	2.331	2.547	3.422	3.330
2015	9.956	9.169	1.839	1.637	1.088	1.528	2.420	1.439	1.787	2.258	2.758	3.311
2016	8.234	10362	3.222	1.714	1.676	1.687	3.425	2.056	2.089	3.449	3.562	4.294
2017	10.477	10.995	3.432	2.690	1.797	1.673	7.988	4.193	4.619	6.395	5.868	7.827
2018	11.912	14.209	6.061	4.209	2.640	3.016	6.645	3.727	6.689	5.141	6.080	6.692
2019	8.551	11.430	5.154	3.470	2.863							

Tabla 3: Llegadas de turista en las comunas de Panguipulli. Se organiza las llegadas de turistas en establecimientos de alojamiento turístico desde enero de 2009 hasta mayo de 2019. Obtenido de información disponible en el INE. Se debe considerar que la metodología entre 2009 a 2014, entre 2015 a junio de 2017 y entre julio 2017 al actual, son diferentes, por lo cual no son valores compatibles entre sí para tratamientos estadísticos.

PANGUIPULLI	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2009	1.734	1.651	442	385	314	288	526	653	366	344	429	548
2010	2.330	3.008	323	450	446	394	597	465	430	475	529	484
2011	2.801	11.372	703	1.937	1.378	1.080	1.841	1.397	1.264	1.692	2.190	1.698
2012	3.986	4.990	1.674	1.529	1.149	1.184	1.615	1.293	1.608	1.596	1.617	1.728
2013	3.085	4.890	2.148	1.252	1.169	1.096	1.620	1.290	1.893	1.722	1.927	2.148
2014	4.417	5.079	1.890	1.499	1.183	1.061	1.326	776	1.302	1.143	1.105	1.218
2015	5.260	7.089	2.350	1.847	2.992	2.631	2.960	2.008	2.091	2.226	2.224	2.955
2016	5.255	6.822	2.232	1.299	2.860	2.356	2.611	1.838	1.745	2.023	2.547	2.654
2017	4.805	6.119	2.198	1.624	2.216	2.490	5.014	2.803	3.567	3.358	3.617	4.453
2018	7.463	10.121	5.154	3.269	3.028	2.223	5.558	2.914	3.724	3.355	3.665	3.764
2019	7.427	10.520	6.544	4.498	4.113							

Tabla 4: Lista de los establecimientos de alojamiento turístico. La lista incluye todos los establecimientos de alojamiento turístico utilizados para el análisis de exposición dentro del área de las entidades seleccionadas para este trabajo. Obtenido de la base de datos de SERNATUR.

Establecimientos de Alojamiento Turístico	Comuna	Latitud	Longitud
AGROCAMPING TRINIDAD	Villarrica	-39,475	-72,168
ALDEA NAUKANA POSADA BOUTIQUE	Pucón	-39,273	-71,972
ALPES APART HOTEL	Pucón	-39,276	-71,973
ALTO VILLARRICA, CABAÑAS	Villarrica	-39,328	-72,224
ALTO VILLARRICA, HOTEL	Villarrica	-39,339	-72,221
ANTU NEWEN	Pucón	-39,285	-71,964
APART HOTEL ANTU DE VILLARRICA	Villarrica	-39,276	-72,234
APART HOTEL ARAUCO PUCÓN	Pucón	-39,275	-71,973
APART HOTEL DEL VOLCAN	Pucón	-39,276	-71,976
APART HOTEL DOS CASTAÑOS	Pucón	-39,282	-71,953
APART HOTEL KIÑE PAYUN	Pucón	-39,279	-71,960
APART HOTEL MONTE VERDE	Pucón	-39,303	-72,036
APART HOTEL PUERTA DEL LAGO	Pucón	-39,276	-71,975
APART-HOTEL LOS GUALLES CANDELARIA DE PUCÓN	Pucón	-39,295	-72,011
ARAUCARIAS HOTEL & SPA	Pucón	-39,278	-71,978
ATELIER CENTRAL HOTEL	Villarrica	-39,281	-72,231
B & B LA CODORNIZ	Villarrica	-39,332	-72,092
BAMBU	Pucón	-39,317	-71,979
BUENAVISTA PUCÓN	Pucón	-39,282	-71,959
CABAÑA HOSPEDAJE BRASIL	Pucón	-39,278	-71,975
CABAÑAS AKUBRA	Pucón	-39,283	-71,983
CABAÑAS ALIWEN	Villarrica	-39,485	-72,145
CABAÑAS ALMONI DEL LAGO	Pucón	-39,294	-72,009
CABAÑAS ALTO DEL LAGO	Panguipulli	-39,572	-72,003
CABAÑAS ALTO MISIMALI	Pucón	-39,302	-72,030
CABAÑAS AMAPOLA	Pucón	-39,274	-71,976
CABAÑAS ANTU MAWUN	Pucón	-39,277	-71,975
CABAÑAS ANTU-MAJEN	Panguipulli	-39,571	-72,000
CABAÑAS ANTUPILLAN	Pucón	-39,275	-71,968
CABAÑAS ARAUCARIA	Villarrica	-39,489	-72,161
CABAÑAS BARRERA	Villarrica	-39,492	-72,157
CABAÑAS BELEN	Villarrica	-39,330	-72,223
CABAÑAS BUNGALOWLANDIA	Villarrica	-39,278	-72,222

Tabla 4 (continuación): Lista de los establecimientos de alojamiento turístico.

Establecimientos de Alojamiento Turístico	Comuna	Latitud	Longitud
CABAÑAS CANTAROS DE PUCÓN	Villarrica	-39,302	-72,117
CABAÑAS CASABLANCA	Villarrica	-39,282	-72,226
CABAÑAS CHAILLUPEN	Villarrica	-39,279	-72,231
CABAÑAS CHAILLUPEN	Villarrica	-39,488	-72,157
CABAÑAS COMPLEJO TURISTICO SANTA ELENA	Villarrica	-39,475	-72,168
CABAÑAS COÑARIPE TERMAS & SPA	Panguipulli	-39,580	-71,996
CABAÑAS DEL ALBA	Pucón	-39,277	-71,970
CABAÑAS DON FRANCISCO	Villarrica	-39,481	-72,166
CABAÑAS DON JUAN	Villarrica	-39,285	-72,226
CABAÑAS DON RAUL	Pucón	-39,276	-71,972
CABAÑAS DON TITO	Villarrica	-39,311	-72,233
CABAÑAS DONDE MORA	Villarrica	-39,283	-72,225
CABAÑAS DUHATAO	Villarrica	-39,491	-72,160
CABAÑAS ECO TERMAS PELLAIFA	Panguipulli	-39,618	-71,915
CABAÑAS ECOCAMPING CALAFQUEN	Panguipulli	-39,554	-72,016
CABAÑAS ECOCAMPING ÑISOLEUFU	Panguipulli	-39,570	-72,065
CABAÑAS EL ARRAYAN	Villarrica	-39,282	-72,224
CABAÑAS EL DORADO PUCÓN	Pucón	-39,279	-71,958
CABAÑAS EL EDEN DE PUCÓN	Pucón	-39,280	-71,945
CABAÑAS EL LUCERO	Pucón	-39,281	-71,954
CABAÑAS EL MAITEN	Villarrica	-39,475	-72,168
CABAÑAS EL MANZANO	Pucón	-39,276	-71,974
CABAÑAS EL MOLINO SUYAY	Villarrica	-39,300	-72,117
CABAÑAS EL MORRO	Villarrica	-39,285	-72,227
CABAÑAS EL PARQUE	Villarrica	-39,291	-72,202
CABAÑAS EL PINO	Villarrica	-39,280	-72,224
CABAÑAS EL RALE	Villarrica	-39,287	-72,223
CABAÑAS EL ROBLE DE COÑARIPE	Panguipulli	-39,572	-72,010
CABAÑAS EL SAUCE 2	Panguipulli	-39,572	-72,003
CABAÑAS EL VECINO	Panguipulli	-39,571	-72,003
CABAÑAS ENTRE LAGOS Y VOLCANES	Villarrica	-39,281	-72,225
CABAÑAS ENTRE MONTAÑAS	Panguipulli	-39,573	-72,103
CABAÑAS EPULAFQUEN	Panguipulli	-39,572	-72,010
CABAÑAS ESCORIAL	Villarrica	-39,501	-72,105
CABAÑAS FLOR DE PIEDRA	Villarrica	-39,490	-72,162

Tabla 4 (continuación): Lista de los establecimientos de alojamiento turístico.

Establecimientos de Alojamiento Turístico	Comuna	Latitud	Longitud
CABAÑAS HERRERA	Villarrica	-39,275	-72,236
CABAÑAS HOSTAL EL PROFESOR	Villarrica	-39,288	-72,229
CABAÑAS HUECHUNTU	Pucón	-39,344	-71,972
CABAÑAS HUIMPALAY-TRAY	Villarrica	-39,299	-72,101
CABAÑAS INALTU LEWFU	Villarrica	-39,276	-72,232
CABAÑAS INALTU-HUAPI	Villarrica	-39,493	-72,157
CABAÑAS KALLFURAYEN	Villarrica	-39,304	-72,091
CABAÑAS KARI MAPU PARK	Pucón	-39,266	-71,887
CABAÑAS KARINA	Villarrica	-39,282	-72,225
CABAÑAS KATEMU	Villarrica	-39,282	-72,227
CABAÑAS KERNAYEL	Pucón	-39,278	-71,962
CABAÑAS KILA RUKA	Villarrica	-39,284	-72,226
CABAÑAS KUME - HUENEY	Villarrica	-39,282	-72,231
CABAÑAS L'SCALE	Panguipulli	-39,571	-72,004
CABAÑAS LA DOLCE VITA	Pucón	-39,290	-72,000
CABAÑAS LA PALMERA	Pucón	-39,274	-71,976
CABAÑAS LA PIEDRA	Panguipulli	-39,564	-72,010
CABAÑAS LAGO VILLARRICA	Villarrica	-39,280	-72,232
CABAÑAS LAS ARAUCANAS	Villarrica	-39,278	-72,232
CABAÑAS LAS ROSAS	Villarrica	-39,483	-72,136
CABAÑAS LAS VERTIENTES	Pucón	-39,218	-71,737
CABAÑAS LAUQUEN	Panguipulli	-39,570	-72,008
CABAÑAS LAUTARO	Villarrica	-39,281	-72,224
CABAÑAS LEO	Pucón	-39,278	-71,963
CABAÑAS L'ETOILE	Pucón	-39,287	-71,978
CABAÑAS LIDIA	Villarrica	-39,279	-72,227
CABAÑAS LIMAY	Villarrica	-39,485	-72,163
CABAÑAS LLACOLEN	Villarrica	-39,280	-72,222
CABAÑAS LLEU LLEU	Pucón	-39,274	-71,976
CABAÑAS LONCOTRARO	Pucón	-39,306	-72,062
CABAÑAS LOPEZ	Villarrica	-39,299	-72,223
CABAÑAS LORENA	Villarrica	-39,297	-72,107
CABAÑAS LOS ARRAYANES	Pucón	-39,275	-71,949
CABAÑAS LOS CISNES	Villarrica	-39,277	-72,223
CABAÑAS LOS OSITOS	Villarrica	-39,281	-72,224

Tabla 4 (continuación): Lista de los establecimientos de alojamiento turístico.

Establecimientos de Alojamiento Turístico	Comuna	Latitud	Longitud
CABAÑAS LOS TILOS	Pucón	-39,272	-71,976
CABAÑAS MADRIGAL	Villarrica	-39,284	-72,224
CABAÑAS MAPULAY	Pucón	-39,276	-71,968
CABAÑAS MARJORIE	Pucón	-39,277	-71,972
CABAÑAS MAYA	Villarrica	-39,281	-72,236
CABAÑAS MELITA	Panguipulli	-39,513	-72,084
CABAÑAS METREÑEHUE	Pucón	-39,267	-71,827
CABAÑAS MILLAÑANCO	Villarrica	-39,487	-72,155
CABAÑAS MONTENEGRO	Villarrica	-39,278	-72,222
CABAÑAS NICOLAS	Villarrica	-39,281	-72,228
CABAÑAS OMILEN	Pucón	-39,291	-71,947
CABAÑAS OMILEN ANTU PUCÓN	Pucón	-39,294	-71,986
CABAÑAS ORILLAS DEL LAGO	Pucón	-39,277	-71,978
CABAÑAS ORLANDO ARANDA	Panguipulli	-39,555	-72,017
CABAÑAS PEDRO DE VALDIVIA	Villarrica	-39,281	-72,231
CABAÑAS PLAYA LINDA	Villarrica	-39,300	-72,097
CABAÑAS PUCHI	Villarrica	-39,286	-72,229
CABAÑAS QUILAMALEN	Villarrica	-39,254	-72,232
CABAÑAS QUIMEY GNECHEN	Villarrica	-39,277	-72,231
CABAÑAS QUIÑOLAFQUEN	Pucón	-39,279	-71,959
CABAÑAS RAÑINTU EPUPILLA	Pucón	-39,338	-71,755
CABAÑAS RISSO	Villarrica	-39,280	-72,237
CABAÑAS ROY ROY	Villarrica	-39,487	-72,160
CABAÑAS RUCA LEMU	Pucón	-39,291	-71,929
CABAÑAS RUCA MALAL	Pucón	-39,277	-71,966
CABAÑAS RUCA RAYEN	Villarrica	-39,488	-72,158
CABAÑAS RUCAALIWEN	Pucón	-39,286	-71,943
CABAÑAS RUKA TOLTEN	Villarrica	-39,277	-72,230
CABAÑAS SAN JOSE	Villarrica	-39,282	-72,230
CABAÑAS SAN JOSE / LICAN RAY	Villarrica	-39,481	-72,166
CABAÑAS SANDO	Villarrica	-39,289	-72,227
CABAÑAS SANTA CLARA	Pucón	-39,287	-71,946
CABAÑAS SANTA MARIA	Pucón	-39,279	-71,958
CABAÑAS SANTA TERESA	Villarrica	-39,284	-72,228
CABAÑAS SONIA	Villarrica	-39,279	-72,225

Tabla 4 (continuación): Lista de los establecimientos de alojamiento turístico.

Establecimientos de Alojamiento Turístico	Comuna	Latitud	Longitud
CABAÑAS TERMAS DE SAN LUIS	Pucón	-39,346	-71,689
CABAÑAS TERMAS VERGARA	Panguipulli	-39,509	-71,892
CABAÑAS TERRACRATER	Villarrica	-39,304	-72,161
CABAÑAS TONK	Pucón	-39,273	-71,975
CABAÑAS TRAITRAICO	Villarrica	-39,277	-72,228
CABAÑAS TRAPANANDA	Villarrica	-39,488	-72,158
CABAÑAS TRIGAL	Villarrica	-39,280	-72,224
CABAÑAS TUNKELEN	Villarrica	-39,292	-72,106
CABAÑAS TUNKELEN	Villarrica	-39,302	-72,091
CABAÑAS VALLES DE PUCÓN	Pucón	-39,282	-71,928
CABAÑAS VILLAITUE	Villarrica	-39,285	-72,223
CABAÑAS Y CAMPING LOS PINOS	Villarrica	-39,480	-72,167
CABAÑAS Y RESTAURANT RUKA RAYUN	Panguipulli	-39,584	-72,026
CABAÑAS YANQUIRAY	Villarrica	-39,299	-72,101
CABAÑAS, COMPLEJO TURISTICO HUIMPALAY LEMU	Villarrica	-39,299	-72,101
CABAÑAS, HOSTAL TIA LETY	Villarrica	-39,255	-72,233
CABINAS MOLCO	Villarrica	-39,303	-72,084
CAMPING ARENA Y SOL	Panguipulli	-39,573	-72,011
CAMPING CALAFQUEN	Panguipulli	-39,504	-72,103
CAMPING CHAILLUPEN	Villarrica	-39,493	-72,114
CAMPING COÑARIPE	Panguipulli	-39,568	-72,007
CAMPING CORDILLERA	Panguipulli	-39,576	-72,014
CAMPING EL EDEN	Villarrica	-39,292	-72,216
CAMPING EL ROI	Panguipulli	-39,515	-72,079
CAMPING EL TREBOL	Villarrica	-39,486	-72,164
CAMPING EL VIAJERO	Panguipulli	-39,521	-71,916
CAMPING ENCUESTRO	Villarrica	-39,486	-72,164
CAMPING FLOR DEL LAGO	Panguipulli	-39,569	-72,009
CAMPING HUECHUNTU	Pucón	-39,315	-71,979
CAMPING HUIMPALAY LEMU	Villarrica	-39,302	-72,088
CAMPING INALAFQUEN	Panguipulli	-39,544	-72,056
CAMPING LA ARAUCARIA	Pucón	-39,230	-71,655
CAMPING LLEUQUE	Pucón	-39,262	-71,826
CAMPING LORENA	Villarrica	-39,297	-72,107
CAMPING LOS COPIHUES	Panguipulli	-39,552	-72,028

Tabla 4 (continuación): Lista de los establecimientos de alojamiento turístico.

Establecimientos de Alojamiento Turístico	Comuna	Latitud	Longitud
CAMPING MOLCO BEACH	Villarrica	-39,331	-72,097
CAMPING PLAYA LINDA	Villarrica	-39,299	-72,100
CAMPING PLAYA PUCURA	Panguipulli	-39,582	-72,036
CAMPING PRADO VERDE	Villarrica	-39,491	-72,172
CAMPING RAYEN	Panguipulli	-39,517	-72,075
CAMPING RUCAHUE	Panguipulli	-39,570	-72,011
CAMPING RUKA PANGUI	Pucón	-39,297	-71,944
CAMPING SAN JOSE	Villarrica	-39,485	-72,165
CAMPING WECHUALMAY	Panguipulli	-39,572	-72,000
CAMPING Y CABAÑAS LAS ARAUCARIAS	Panguipulli	-39,554	-72,005
CAMPING Y CABAÑAS PRADO VERDE	Villarrica	-39,487	-72,174
CASA DEL LAGO	Panguipulli	-39,508	-72,087
CASA SATYA PUCÓN	Pucón	-39,276	-71,967
CELESTIAL INN	Pucón	-39,283	-71,977
CENTRO ECO - VACACIONAL HOTEL VILLARRICA	Villarrica	-39,282	-72,223
CENTRO TURISTICO CABAÑAS ALTOS DEL LAGO	Pucón	-39,304	-72,067
CHILI KIWI HOSTEL	Pucón	-39,277	-71,979
COMPLEJO TURISTICO BOSQUES DE LONCOTRARO	Villarrica	-39,312	-72,081
COMPLEJO TURISTICO EL CONQUISTADOR	Villarrica	-39,486	-72,162
COMPLEJO TURÍSTICO PUCÓN	Pucón	-39,287	-71,966
DEPARTAMENTOS LOS REFUGIOS	Pucón	-39,284	-71,981
ECO CAMPING Y RESTAURANTE LAGO PELLAIFA	Panguipulli	-39,596	-71,976
ELEMENTOS TURISMO EXPERIENCIAL & ECOHOSTEL	Pucón	-39,275	-71,963
FRONTERA PUCÓN HOSTAL	Pucón	-39,274	-71,981
GECKO HOSTEL	Pucón	-39,281	-71,976
GRAN HOTEL PUCÓN	Pucón	-39,272	-71,978
HACIENDA HOTEL VIRA VIRA	Pucón	-39,252	-71,841
HASHTAG HOSTEL PUCÓN	Pucón	-39,282	-71,967
HOSPEDAJE ALICIA	Pucón	-39,276	-71,969
HOSPEDAJE DONDE MORA	Villarrica	-39,284	-72,226
HOSPEDAJE EL LUCERO	Pucón	-39,281	-71,953
HOSPEDAJE ENTRE LAGOS	Panguipulli	-39,590	-72,007
HOSPEDAJE FAMILIAR WAYWEN KURUF	Pucón	-39,285	-71,941
HOSPEDAJE GLADYS	Pucón	-39,278	-71,971
HOSPEDAJE IRMA	Pucón	-39,277	-71,977

Tabla 4 (continuación): Lista de los establecimientos de alojamiento turístico.

Establecimientos de Alojamiento Turístico	Comuna	Latitud	Longitud
HOSPEDAJE LA FLOR DE CHILE	Villarrica	-39,290	-72,229
HOSPEDAJE LAS ROSAS	Villarrica	-39,484	-72,161
HOSPEDAJE MIREL	Panguipulli	-39,578	-71,970
HOSPEDAJE NICOLAS	Villarrica	-39,281	-72,228
HOSPEDAJE Y HOSTAL SONIA	Pucón	-39,277	-71,977
HOSPEDAJE Y RESIDENCIAL CALAFQUEN	Panguipulli	-39,570	-72,005
HOSPEDAJE Y RESTAURANT ANTURAYEN	Pucón	-39,236	-71,961
HOSTAL ANDINO	Pucón	-39,274	-71,974
HOSTAL ARAUCO	Pucón	-39,273	-71,974
HOSTAL BOLDOS DEL LAGO	Villarrica	-39,290	-72,220
HOSTAL CASABLANCA	Pucón	-39,273	-71,975
HOSTAL CHUMAY	Panguipulli	-39,569	-72,008
HOSTAL CUMBRES PUCÓN	Pucón	-39,278	-71,970
HOSTAL DON JUAN	Villarrica	-39,285	-72,227
HOSTAL DONDE EGIDIO	Pucón	-39,279	-71,972
HOSTAL EL ARRAYAN	Villarrica	-39,282	-72,224
HOSTAL EL NOGAL PUCÓN	Pucón	-39,275	-71,964
HOSTAL EL PROFESOR	Villarrica	-39,284	-72,224
HOSTAL EMALAFQUEN	Pucón	-39,277	-71,971
HOSTAL FLAMINGO	Pucón	-39,272	-71,975
HOSTAL GERONIMO	Pucón	-39,273	-71,972
HOSTAL GRACIELA	Pucón	-39,278	-71,975
HOSTAL HOFMANN	Villarrica	-39,484	-72,154
HOSTAL HOLA PUCÓN	Pucón	-39,272	-71,974
HOSTAL KATEMU	Villarrica	-39,282	-72,227
HOSTAL KLAUS	Pucón	-39,282	-71,968
HOSTAL KUTRALWE	Pucón	-39,277	-71,966
HOSTAL LA NUEZ	Pucón	-39,275	-71,971
HOSTAL LA TETERA	Pucón	-39,275	-71,973
HOSTAL LICAN-RAY	Villarrica	-39,482	-72,152
HOSTAL MAHUIDA	Pucón	-39,277	-71,971
HOSTAL MAITAHUE	Pucón	-39,279	-71,966
HOSTAL MARJORIE	Pucón	-39,275	-71,972
HOSTAL MERKEN	Villarrica	-39,249	-72,241
HOSTAL MONICA	Pucón	-39,277	-71,968

Tabla 4 (continuación): Lista de los establecimientos de alojamiento turístico.

Establecimientos de Alojamiento Turístico	Comuna	Latitud	Longitud
HOSTAL MONTAHUE	Villarrica	-39,283	-72,231
HOSTAL MULLER	Pucón	-39,277	-71,971
HOSTAL NATURE	Pucón	-39,275	-71,971
HOSTAL PATAGONIA	Villarrica	-39,492	-72,154
HOSTAL PLAYA GRANDE	Villarrica	-39,485	-72,156
HOSTAL PUCÓN	Pucón	-39,281	-71,954
HOSTAL PUCÓN SUR	Pucón	-39,279	-71,962
HOSTAL RAQUIFERUCA	Pucón	-39,278	-71,974
HOSTAL RAYEN	Villarrica	-39,285	-72,225
HOSTAL RAYITO DE SOL	Pucón	-39,276	-71,973
HOSTAL RIO LIBRE	Pucón	-39,276	-71,970
HOSTAL TIA LETY	Villarrica	-39,254	-72,233
HOSTAL VALENTINO	Villarrica	-39,281	-72,226
HOSTAL VICTOR	Pucón	-39,279	-71,972
HOSTAL VISTA VOLCAN	Villarrica	-39,283	-72,232
HOSTAL WOHLBERG, DEPARTAMENTO	Pucón	-39,278	-71,972
HOSTAL Y CABAÑAS BRIGITTE	Villarrica	-39,277	-72,230
HOSTAL ZEGERS	Villarrica	-39,287	-72,228
HOSTEL 10	Pucón	-39,275	-71,974
HOSTEL ALTO PALGUIN	Pucón	-39,279	-71,972
HOSTEL ONE WAY	Pucón	-39,273	-71,974
HOSTEL PATACON	Pucón	-39,274	-71,975
HOSTERIA BILBAO	Villarrica	-39,278	-72,223
HOSTERIA DE LA COLINA	Villarrica	-39,294	-72,232
HOSTERIA ECOLE	Pucón	-39,275	-71,973
HOSTERIA HUE QUIMEY	Villarrica	-39,283	-72,222
HOSTERIA TRICAHUE	Pucón	-39,286	-71,947
HOSTERIA VICTOR'S PLAYA	Villarrica	-39,494	-72,156
HOTEL AMUN	Villarrica	-39,279	-72,225
HOTEL ANTUMALAL	Pucón	-39,288	-71,995
HOTEL ARAUCARIAS	Pucón	-39,276	-71,979
HOTEL BAR RESTAURANT VILLA LINDA	Villarrica	-39,282	-72,229
HOTEL BORDELUZ	Villarrica	-39,301	-72,095
HOTEL CASA SOLARIA	Pucón	-39,278	-71,977
HOTEL CUMBRES DEL SUR	Pucón	-39,276	-71,970

Tabla 4 (continuación): Lista de los establecimientos de alojamiento turístico.

Establecimientos de Alojamiento Turístico	Comuna	Latitud	Longitud
HOTEL DEL MONTAÑES	Pucón	-39,275	-71,971
HOTEL DOS CASTAÑOS	Pucón	-39,281	-71,953
HOTEL EL CIERVO	Villarrica	-39,284	-72,226
HOTEL EL COIHUE	Pucón	-39,272	-71,973
HOTEL EL COIHUE	Pucón	-39,276	-71,970
HOTEL EL PARQUE	Villarrica	-39,293	-72,214
HOTEL ELIZABETH	Panguipulli	-39,567	-72,007
HOTEL ENJOY PARK LAKE	Villarrica	-39,301	-72,088
HOTEL FUENTES	Villarrica	-39,282	-72,228
HOTEL HUINCAHUE	Pucón	-39,273	-71,977
HOTEL INTERLAKEN	Pucón	-39,280	-71,977
HOTEL KOLPING	Villarrica	-39,275	-72,237
HOTEL LA CASONA DE PUCÓN	Pucón	-39,273	-71,979
HOTEL LA PALMERA	Pucón	-39,275	-71,977
HOTEL LA POSADA PLAZA PUCÓN	Pucón	-39,274	-71,979
HOTEL LAGO VILLARRICA	Villarrica	-39,280	-72,232
HOTEL LICAN RAY	Villarrica	-39,489	-72,158
HOTEL LOS MAITENES	Pucón	-39,276	-71,976
HOTEL MALALHUE	Pucón	-39,279	-71,958
HOTEL MARTINA DE GOÑI	Pucón	-39,274	-71,972
HOTEL MAUCHO	Pucón	-39,281	-71,954
HOTEL O. GUDENSCHWAGER	Pucón	-39,275	-71,981
HOTEL OREGON	Pucón	-39,275	-71,977
HOTEL PATAGONIA PUCÓN	Pucón	-39,274	-71,976
HOTEL POSADA DEL RIO	Pucón	-39,281	-71,862
HOTEL RESTAURANT HARRIS	Villarrica	-39,490	-72,148
HOTEL SUEÑOS DEL VOLCAN	Villarrica	-39,285	-72,225
HOTEL TERRAZA SUITE	Villarrica	-39,283	-72,222
HOTEL VIENTOS DEL SUR	Pucón	-39,276	-71,971
HOUSE OF COLORS BACKPACKERS-HOSTEL	Pucón	-39,279	-71,971
HUARRANCHI BUNGALOWS	Pucón	-39,284	-71,981
HUINCATERRA	Villarrica	-39,392	-72,098
I LOVE PUCÓN HOSTEL & BACKPACKERS	Pucón	-39,275	-71,976
KILA LEUFU, HOSTAL	Pucón	-39,337	-71,757
LA BICICLETA	Pucón	-39,275	-71,974

Tabla 4 (continuación): Lista de los establecimientos de alojamiento turístico.

Establecimientos de Alojamiento Turístico	Comuna	Latitud	Longitud
LACUSTRE TRIP HOSTEL	Pucón	-39,274	-71,974
LACUSTRE TRIP HOSTEL PUCÓN	Pucón	-39,277	-71,973
LIKEN LODGE PUCÓN	Pucón	-39,234	-71,750
LOS CASTAÑOS DE LICANRAY	Villarrica	-39,487	-72,153
LOUNGE BRASIL	Pucón	-39,276	-71,970
LUCKYS HOSTEL	Pucón	-39,272	-71,973
MAGALA DEPARTAMENTOS	Pucón	-39,276	-71,971
MAISON NOMADE BED & BREAKFAST	Pucón	-39,263	-71,826
MAPU HOSTEL	Villarrica	-39,278	-72,229
MAPULAUQUEN CABAÑAS & SPA	Villarrica	-39,295	-72,167
OKORI HOSTEL PUCÓN	Pucón	-39,294	-71,911
OMI KIKA B&B	Villarrica	-39,284	-72,223
PARADISE PUCÓN HOSTEL	Pucón	-39,272	-71,973
PRINCESA INSOLENTA HOSTEL PUCÓN	Pucón	-39,274	-71,972
PUCÓN ADVENTURE HOSTAL	Pucón	-39,275	-71,965
PUCÓN GREEN PARK HOTEL	Pucón	-39,289	-71,939
PUCÓN HOSTEL	Pucón	-39,277	-71,966
PUCÓNTOURS HOSTAL	Pucón	-39,277	-71,976
RESIDENCIAL LINCOYAN	Pucón	-39,276	-71,978
RUCA SUITE	Pucón	-39,276	-71,977
RUKA PUCÓN HOSTEL	Pucón	-39,284	-71,963
SOL Y LAGO SUITE APART HOTEL	Villarrica	-39,303	-72,087
TORRE SUIZA HOSTEL	Villarrica	-39,285	-72,227

Tabla 5: Lista de infraestructura crítica de servicios. El listado incluye los aeródromos, la Capitanía de Puerto de Pucón, centros de salud, servicentros, oficinas de la CONAF, la cruz roja, bomberos, defensa civil, escuelas, hospitales, liceos, municipalidades, carabineros, postas de salud y servicios de atención primaria de urgencias. Modificado del MBN, 2017-18.

Infraestructura Crítica de Servicios	Latitud	Longitud
AERODROMO PUCÓN	-39,292	-71,917
AERODROMO VILLARRICA	-39,317	-71,229
CAPITANIA DE PUERTO DE PUCON	-39,276	-71,980
CENTRO COMUNITARIO DE SALUD FAMILIAR 21 DE MAYO	-39,282	-72,233
CENTRO COMUNITARIO DE SALUD FAMILIAR LOS VOLCANES	-39,294	-72,237
CENTRO DE SALUD FAMILIAR COÑARIPE	-39,568	-72,008
CENTRO DE SALUD FAMILIAR LICAN RAY	-39,489	-72,155
CENTRO DE SALUD FAMILIAR VILLARRICA	-39,294	-72,220
CENTRO DE SALUD RURAL PUCON	-39,279	-71,974
CENTRO DE SALUD URBANO LOS VOLCANES	-39,303	-72,226
COPEC LICAN RAY	-39,485	-72,159
COPEC PUCON	-39,278	-71,976
COPEC VILLARRICA	-39,285	-72,231
COPEC VILLARRICA	-39,280	-72,232
CORPORACION NACIONAL FORESTAL PUCON	-39,276	-71,978
CORPORACION NACIONAL FORESTAL VILLARRICA	-39,279	-72,229
CRUZ ROJA LICAN RAY	-39,487	-72,162
CRUZ ROJA PUCON	-39,280	-71,972
CRUZ ROJA VILLARRICA	-39,278	-72,234
CUARTA COMPAÑIA DE BOMBEROS DE PANGUIPULLI	-39,568	-72,009
DEFENSA CIVIL PUCON	-39,278	-71,968
ESCUELA ALEXANDER GRAHAM BELL	-39,286	-72,224
ESCUELA ALIHUEN	-39,458	-72,127
ESCUELA BASICA CANDELARIA	-39,313	-71,988
ESCUELA BASICA CARILEUFU	-39,239	-71,816
ESCUELA BASICA MUNICIPAL DE EL CLARO	-39,299	-71,900
ESCUELA BASICA PICHARES	-39,261	-71,776
ESCUELA BASICA QUELHUE	-39,261	-71,920
ESCUELA BASICA VILLA SAN PEDRO	-39,268	-71,822
ESCUELA BEATO LUIS ORIONE	-39,283	-72,219
ESCUELA CARLOS HOLZAFEL	-39,283	-71,964
ESCUELA CONQUIL	-39,339	-72,145

Tabla 5 (continuación): Lista de infraestructura crítica de servicios.

Infraestructura Crítica de Servicios	Latitud	Longitud
ESCUELA EL CASTILLO	-39,289	-72,231
ESCUELA EL SANTILLO	-39,348	-71,705
ESCUELA EPUKLEI	-39,487	-72,156
ESCUELA ESTADIO	-39,435	-72,117
ESCUELA HECTOR VALENZUELA CEA	-39,275	-72,233
ESCUELA JOSE MIGUEL MARTINEZ SOTO	-39,331	-71,776
ESCUELA MARIANO LA TORRE	-39,290	-72,223
ESCUELA MOLCO ALTO	-39,328	-72,094
ESCUELA RURAL BOCATOMA	-39,574	-72,179
ESCUELA RURAL CAYUMAPU	-39,613	-72,199
ESCUELA RURAL COZ COZ	-39,618	-72,265
ESCUELA RURAL CURIHUE	-39,545	-72,134
ESCUELA RURAL LLANCAHUE	-39,580	-71,945
ESCUELA RURAL MILLEUCO	-39,489	-72,283
ESCUELA RURAL PITREN	-39,572	-72,213
ESCUELA RURAL PULLINQUE	-39,596	-72,222
ESCUELA RURAL RANINTULELFU	-39,609	-72,158
ESCUELA VALENTIN LETELIER	-39,278	-72,229
ESCUELA VOIPIR DE NANCUL	-39,278	-72,233
HOSPITAL DE VILLARRICA	-39,278	-72,227
HOSPITAL SAN FRANCISCO DE PUCON	-39,279	-71,974
LICEO AGRICOLA Y FORESTAL PHP DE PULLINQUE	-39,600	-72,231
LICEO BICENTENARIO ARAUCANIA	-39,286	-72,228
LICEO DE HOTELERIA Y TURISMO	-39,278	-71,965
LICEO POLITECNICO VILLARRICA	-39,292	-72,230
MUNICIPALIDAD DE PUCON	-39,276	-71,974
MUNICIPALIDAD DE VILLARRICA	-39,283	-72,227
NOVENA COMISARIA PUCON	-39,277	-71,978
PDI CUARTEL VILLARRICA	-39,281	-72,236
PETROBRAS VILLARRICA	-39,288	-72,226
POSTA DE SALUD RURAL AÑILCO	-39,458	-72,257
POSTA DE SALUD RURAL BOCATOMA	-39,574	-72,181
POSTA DE SALUD RURAL CABURGA	-39,235	-71,825
POSTA DE SALUD RURAL CATRIPULLI	-39,350	-71,707
POSTA DE SALUD RURAL QUELHUE	-39,261	-71,920

Tabla 5 (continuación): Lista de infraestructura crítica de servicios.

Infraestructura Crítica de Servicios	Latitud	Longitud
POSTA DE SALUD RURAL SAN PEDRO DE PUCON	-39,264	-71,777
PRIMERA COMPAÑIA DE BOMBEROS DE LICAN RAY	-39,485	-72,158
PRIMERA COMPAÑIA DE BOMBEROS DE PUCON	-39,276	-71,974
PRIMERA COMPAÑIA DE BOMBEROS DE VILLARRICA	-39,281	-72,227
RETEN CATRIPULLI	-39,348	-71,706
RETEN COÑARIPE	-39,566	-72,009
RETEN LICAN RAY	-39,487	-72,161
SEGUNDA COMPAÑIA DE BOMBEROS DE PUCON	-39,280	-71,973
SEPTIMA COMISARIA VILLARRICA	-39,278	-72,226
SERVICIO DE ATENCION PRIMARIA DE URGENCIA LOS VOLCANES	-39,303	-72,226
SERVICIO DE ATENCION PRIMARIA DE URGENCIA PUCON	-39,280	-71,960
SERVICIO DE ATENCION PRIMARIA DE URGENCIA VILLARRICA	-39,294	-72,220
SHELL PUCON	-39,288	-71,944
SHELL PUCON	-39,280	-71,977
SHELL VILLARRICA	-39,287	-72,225
SHELL VILLARRICA	-39,288	-72,226
TERCERA COMPAÑIA DE BOMBEROS DE VILLARRICA	-39,292	-72,231
TERPEL COÑARIPE	-39,574	-72,000

Tabla 6: Lista de infraestructura crítica de turismo. Listado de infraestructura y sitios de interés turístico que incluyen sitios geológicos, áreas verdes, el casino, edificios eclesiásticos, el centro de esquí, la ciudad del deporte, costaneras, entradas a los parques nacionales, ferias artesanales, mercados, miradores, museos, cascadas, parques, puentes interesantes, playas, senderos, termas, valles y el cráter del volcán. Modificado del MBN, 2012.

Infraestructura Crítica de Turismo	Latitud	Longitud
ARCO DE PIEDRA	-39,496	-72,155
ÁREA VERDE JARDINERA DEL CLARO	-39,284	-71,939
ARTESANIAS EN MADERA DE MENETUE	-39,316	-71,770
ARTESANOS RUKA PULLI	-39,332	-71,974
CASINO DE JUEGOS DE PUCON	-39,273	-71,976
CATEDRAL DE VILLARRICA	-39,279	-72,224
CENTRO DE ESQUI PUCON	-39,382	-71,970
CENTRO DE ESQUI PUCON	-39,392	-71,960
CIUDAD DEL DEPORTE	-39,272	-71,948
COSTANERA CACIQUE PUÑULEF	-39,493	-72,152
COSTANERA DE VILLARRICA	-39,288	-72,220
COSTANERA DE VILLARRICA	-39,288	-71,220
ENTRADA PARQUE NACIONAL VILLARRICA RUCAPILLAN	-39,350	-71,970
ENTRADA PARQUE NACIONAL VILLARRICA CHINAY	-39,457	-71,817
FERIA ARTESANAL DE PUCON	-39,274	-71,977
FERIA ARTESANAL KUI KUI DE QUELHUE	-39,272	-71,921
FERIAS ARTESANALES DE LICAN RAY	-39,490	-72,155
FLUJO LAVICO CHAILLUPEN	-39,502	-72,104
GLACIAR PICHILLANCAHUE	-39,441	-71,880
IGLESIA SAN FRANCISCO DE LICAN RAY	-39,487	-72,149
MERCADO MUNICIPAL DE PUCON	-39,277	-71,974
MIRADOR LOS CRATERES	-39,388	-71,928
MONASTERIO SANTA CLARA	-39,282	-71,973
MUSEO HISTORICO Y ARQUEOLOGICO MUNICIPAL DE VILLARRICA	-39,285	-72,224
OJOS DE CABURGUA	-39,239	-71,834
PARQUE CUEVAS VOLCANICAS	-39,374	-71,942
PARQUE EMBARCADERO DE VILLARRICA	-39,281	-72,222
PARQUE LOS BOLDOS	-39,270	-71,976
PASARELA QUELHUE	-39,273	-71,922
PASEO COSTANERA LA POZA	-39,227	-71,980
PENÍNSULA DE LICAN RAY	-39,496	-72,152
PLAYA CAMPING MILLARAY	-39,306	-72,058

Tabla 6 (continuación): Lista de infraestructura crítica de turismo.

Infraestructura Crítica de Turismo	Latitud	Longitud
PLAYA DE COÑARIPE	-39,568	-72,010
PLAYA GRANDE DE LICAN RAY	-39,493	-72,158
PLAYA GRANDE PUCON	-39,270	-71,977
PLAYA LOS ALAMOS	-39,486	-72,143
PLAYA PUCON BEACH O CANDELARIA	-39,290	-72,007
PLAZA BRASIL	-39,279	-71,977
PLAZA DE ARMAS PUCÓN	-39,273	-71,978
PLAZA DE COÑARIPE	-39,568	-72,008
PLAZA MUNICIPAL DE VILLARRICA	-39,278	-71,227
PUENTE CARRETERO RODRIGO DE BASTIDAS	-39,275	-72,229
RAPIDOS DEL RIO TRANCURA	-39,328	-71,829
SALTO DE LA CHINA	-39,400	-71,771
SALTO DEL CARILEUFU	-39,247	-71,843
SALTO DEL LEON	-39,420	-71,761
SALTO DEL PUMA	-39,418	-71,765
SALTO DEL RIO TURBIO	-39,356	-71,864
SALTO LAS VERTIENTES	-39,236	-71,847
SALTO RIO PALGUIN	-39,388	-71,787
SENDERO LOS NEVADOS	-39,460	-71,854
TERMAS DE HUIFE	-39,228	-71,657
TERMAS DE LIUCURA	-39,260	-71,792
TERMAS DE MENETUE	-39,330	-71,721
TERMAS DE PALGUIN	-39,420	-71,784
TERMAS DE SAN LUIS	-39,340	-71,691
TERMAS DE VERGARA	-39,509	-71,892
TERMAS DEL RINCON	-39,507	-71,855
TERMAS GEOMETRICAS	-39,501	-71,874
VALLE DEL FUEGO	-39,475	-71,939
VALLE DEL QUETRUPILLAN	-39,427	-71,764
VOLCAN VILLARRICA	-39,420	-71,940

Tabla 7: Lista de puntos de encuentro. Corresponde a los puntos transitorios en caso de evacuación y los albergues. Obtenidos del Plano de la Evacuación ante Amenaza Volcánica Volcán Villarrica de la ONEMI, 2017, y el Plan de Emergencia por Erupción Volcánica Parque Nacional Villarrica Sector Rucapillán de la CONAF, 2016.

Puntos de Encuentro	Latitud	Longitud
ESCUELA QUELHUE	-39,261	-71,920
PENINSULA PUCON	-39,271	-71,989
LOS CALABOZOS	-39,302	-71,939
CERDUO 1	-39,317	-71,889
CERDUO 2	-39,331	-71,881
PALGUIN	-39,398	-71,783
COÑARIPE	-39,590	-72,019
TRAITRAICO	-39,535	-72,061
PUCURA	-39,530	-72,048
CEMENTERIO	-39,514	-72,077
ESCUELA PUCURA	-39,515	-72,062
LLUNCURA	-39,512	-72,063
PUCURA ALTO	-39,494	-72,060
SEDE SOCIAL	-39,492	-72,103
ESCUELA ALIWEN	-39,458	-72,127
CEMENTERIO	-39,487	-72,166
ESCUELA ESTADIO	-39,438	-72,119
PREDIO SR. VERA	-39,417	-72,058
SEDE KOLPIN	-39,395	-72,094
EL PIRAO	-39,370	-72,075
HUINCACARA SUR	-39,367	-72,155
IGLESIA EVANGELICA CONQUIL	-39,358	-72,129
MOLCO ALTO	-39,329	-72,104
ESCUELA LOS CIERVOS	-39,323	-72,117
HELIPUERTO PARK LAKE	-39,302	-72,089
ESCUELA SAN FCO. MALLOCO	-39,321	-72,147
LOS RISCOS	-39,316	-72,032
IGLESIA ADVENTISTA CANDELARIA	-39,321	-72,010
CURVA EL MIRADOR	-39,352	-71,978
CUEVAS VOLCANICAS	-39,375	-71,939
MIRADOR ÑISOLEUFU	-39,582	-72,033

ANEXO III: MAPAS DE DETALLE DE LA EXPOSICIÓN POBLACIONAL MÁXIMA Y MÍNIMA DEL VOLCÁN VILLARRICA

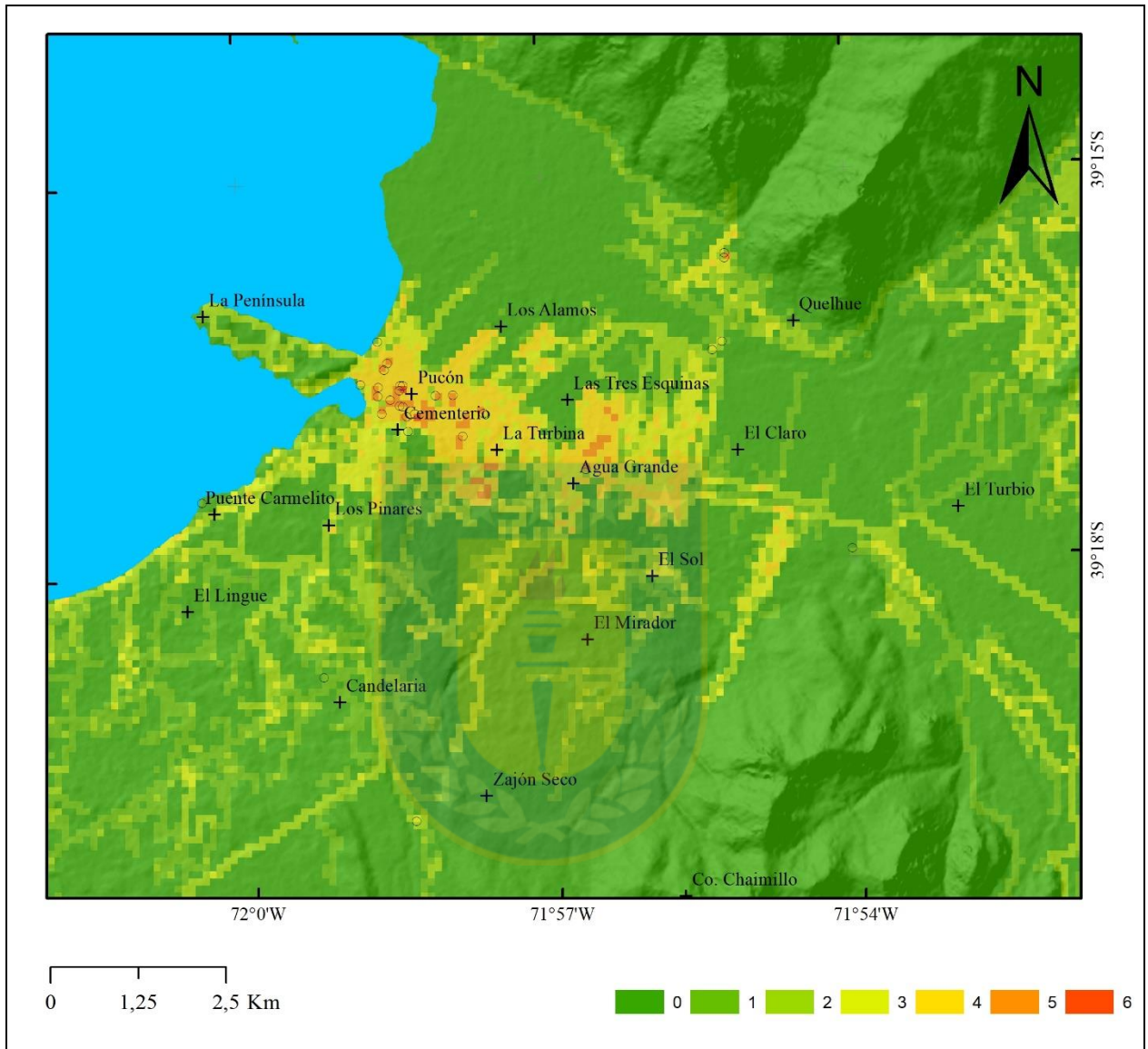


Figura 1: Mapa de grado de exposición mínima de Pucón. La leyenda representa el grado de exposición. En círculo se marcan la infraestructura y sitios críticos de turismo y servicio. Elaboración propia.

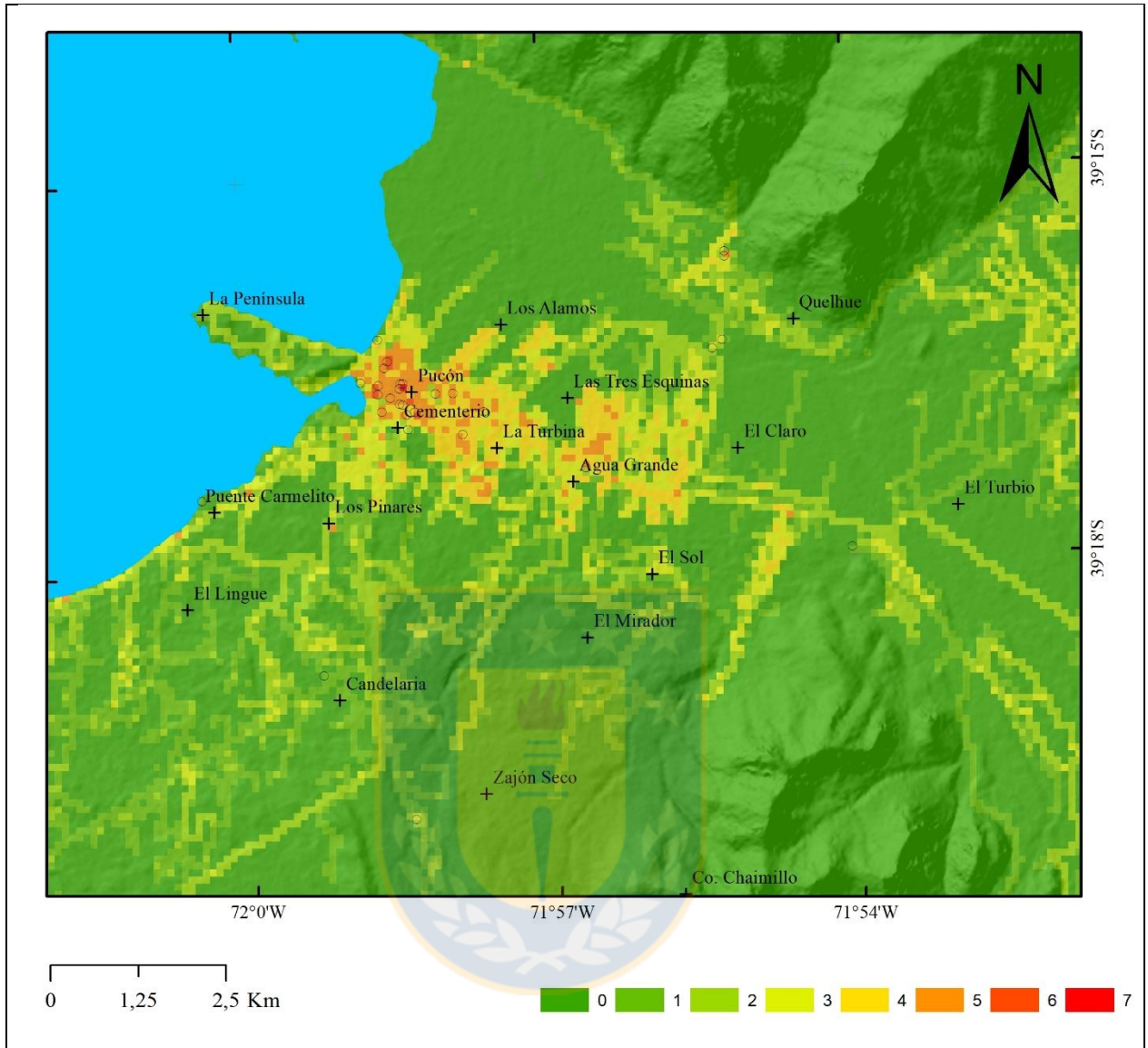


Figura 2: Mapa de grado de exposición máximo de Pucón. La leyenda representa el grado de exposición. En círculo se marcan la infraestructura y sitios críticos de turismo y servicio. Elaboración propia.

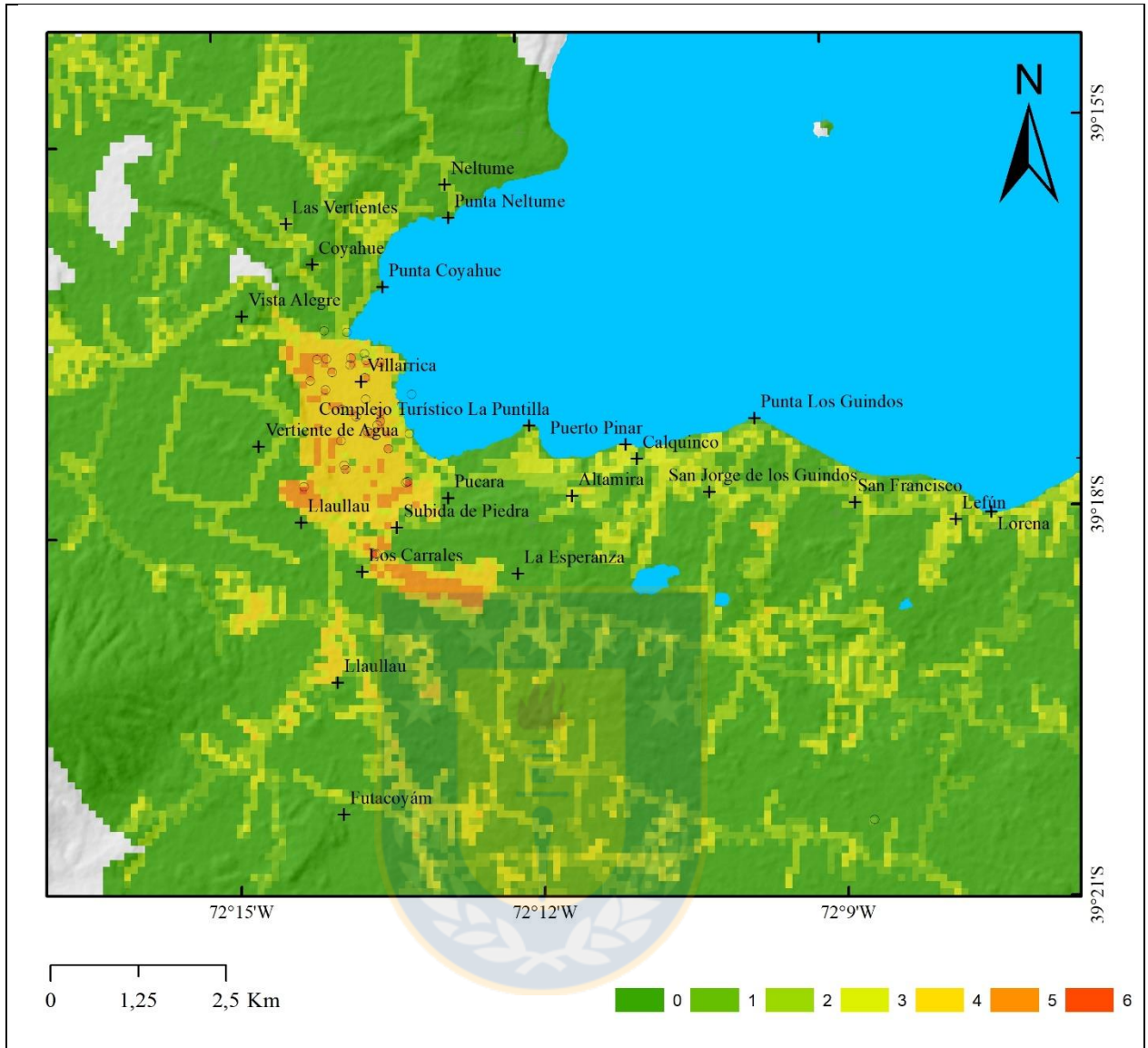


Figura 3: Mapa de grado de exposición mínimo de Villarrica. La leyenda representa el grado de exposición. En círculo se marcan la infraestructura y sitios críticos de turismo y servicio. Elaboración propia.

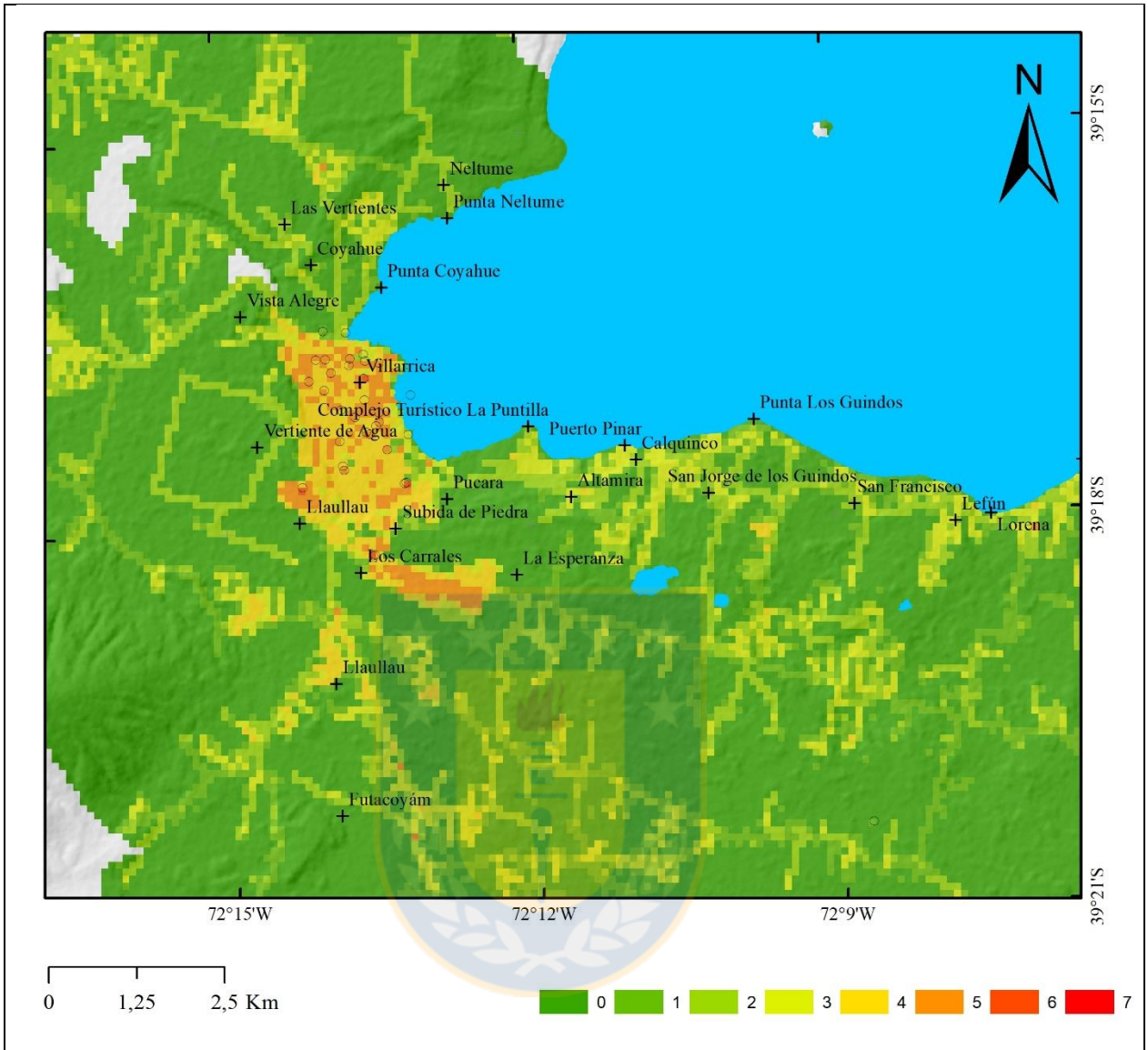


Figura 4: Mapa de grado de exposición máximo de Villarrica. La leyenda representa el grado de exposición. En círculo se marcan la infraestructura y sitios críticos de turismo y servicio. Elaboración propia.

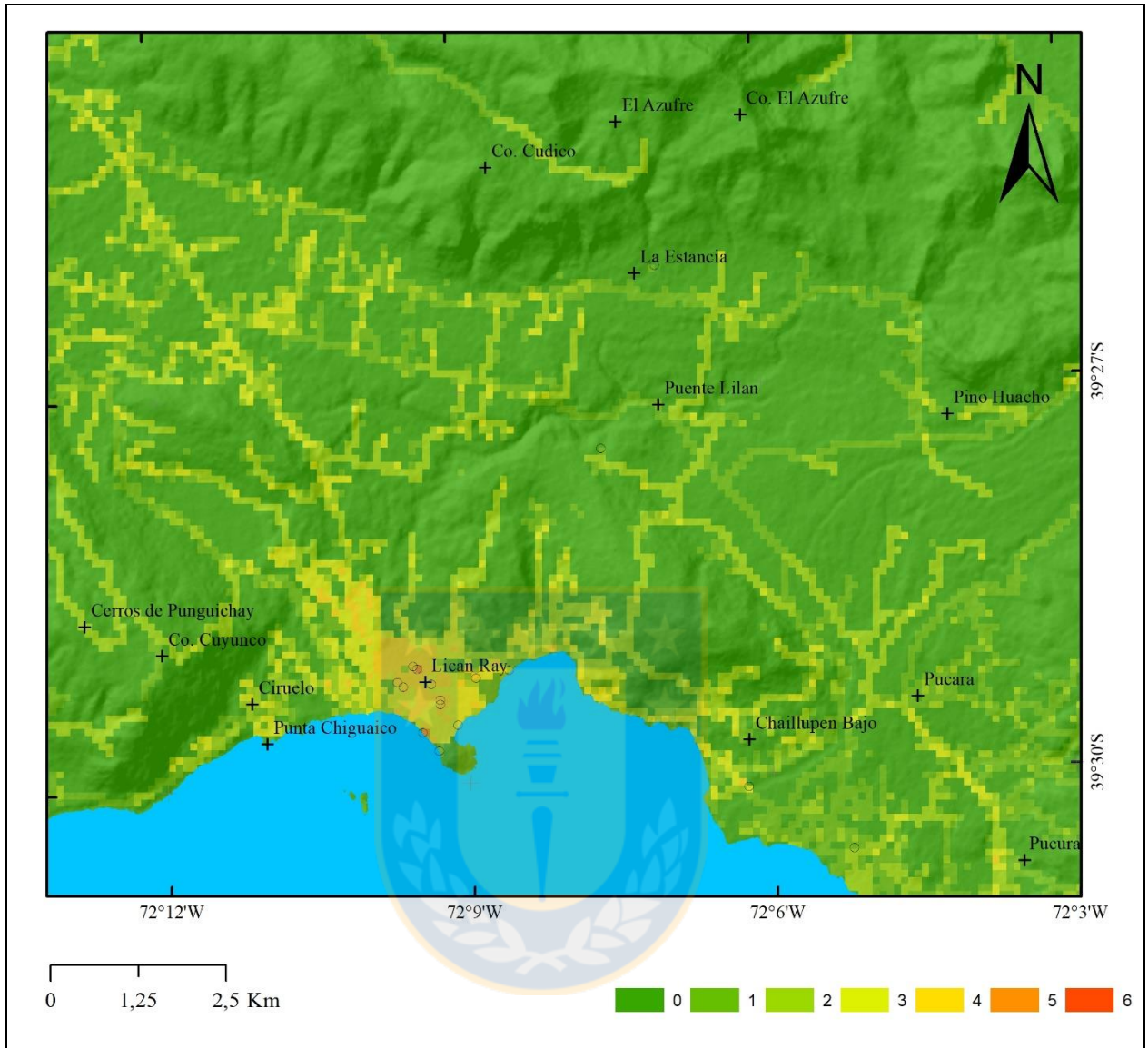


Figura 5: Mapa de grado de exposición mínimo de Licán Ray. La leyenda representa el grado de exposición. En círculo se marcan la infraestructura y sitios críticos de turismo y servicio. Elaboración propia.

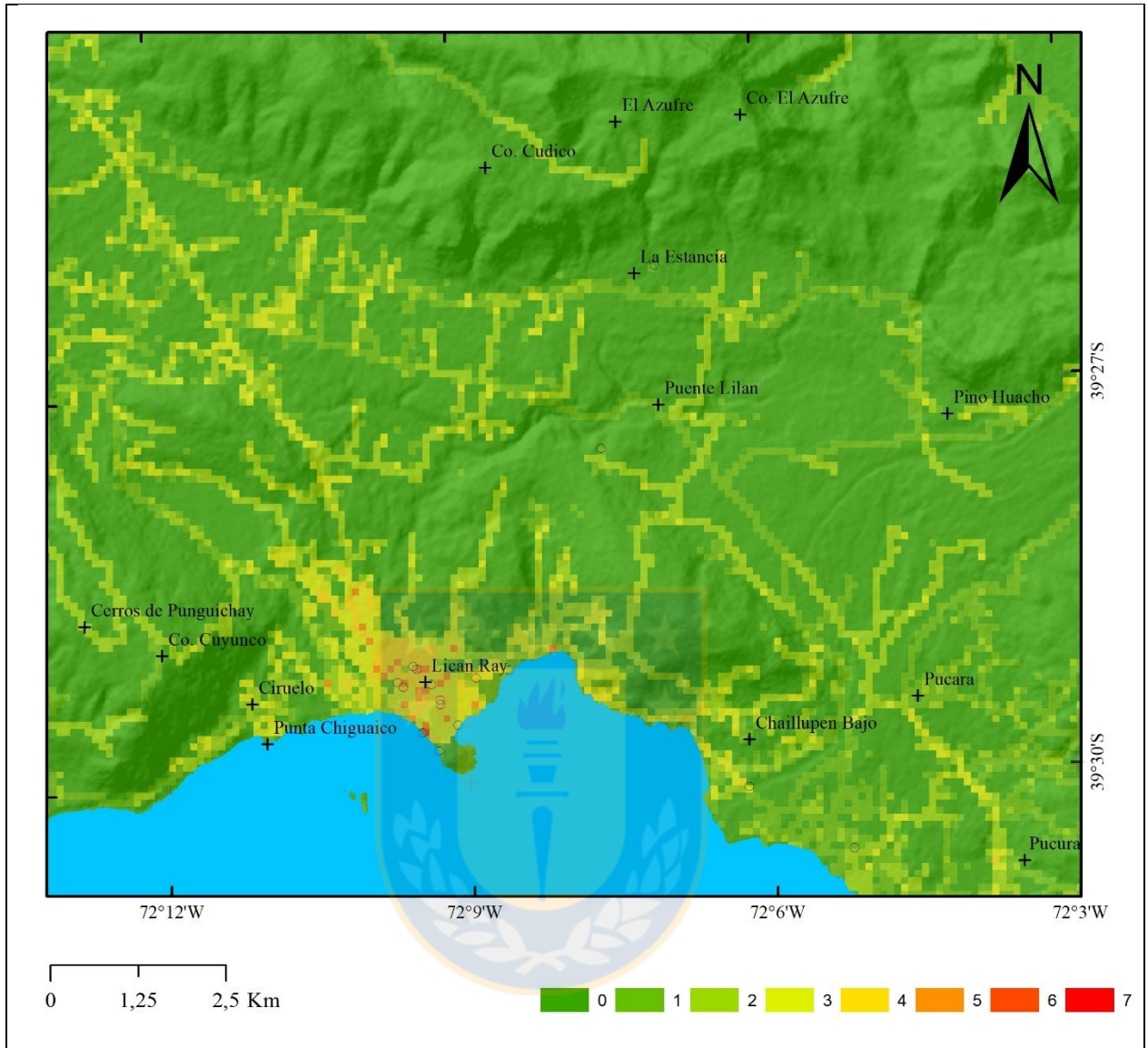


Figura 6: Mapa de grado de exposición máximo de Licán Ray. La leyenda representa el grado de exposición. En círculo se marcan la infraestructura y sitios críticos de turismo y servicio. Elaboración propia.

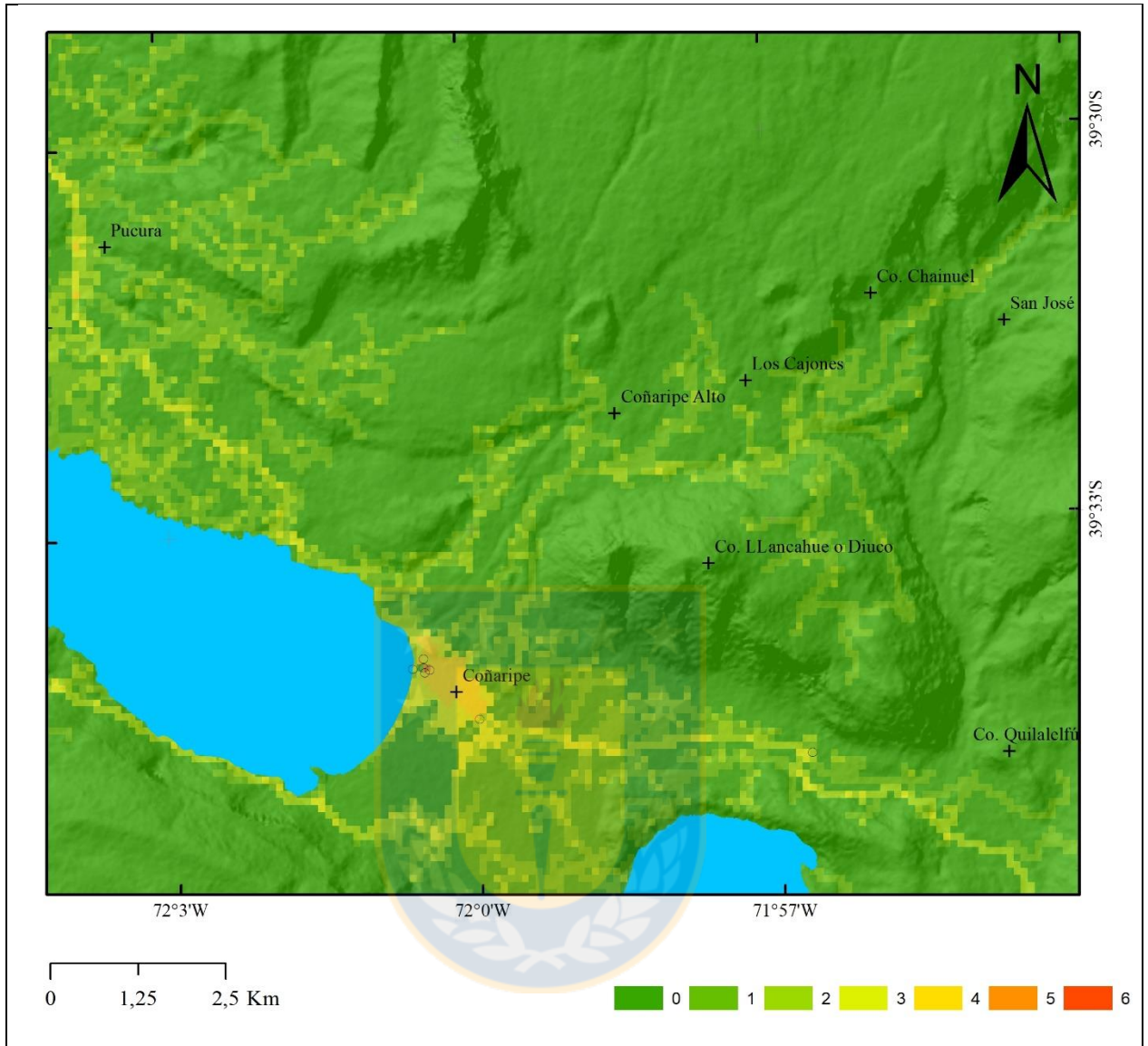


Figura 7: Mapa de grado de exposición mínimo de Coñaripe. La leyenda representa el grado de exposición. En círculo se marcan la infraestructura y sitios críticos de turismo y servicio. Elaboración propia.

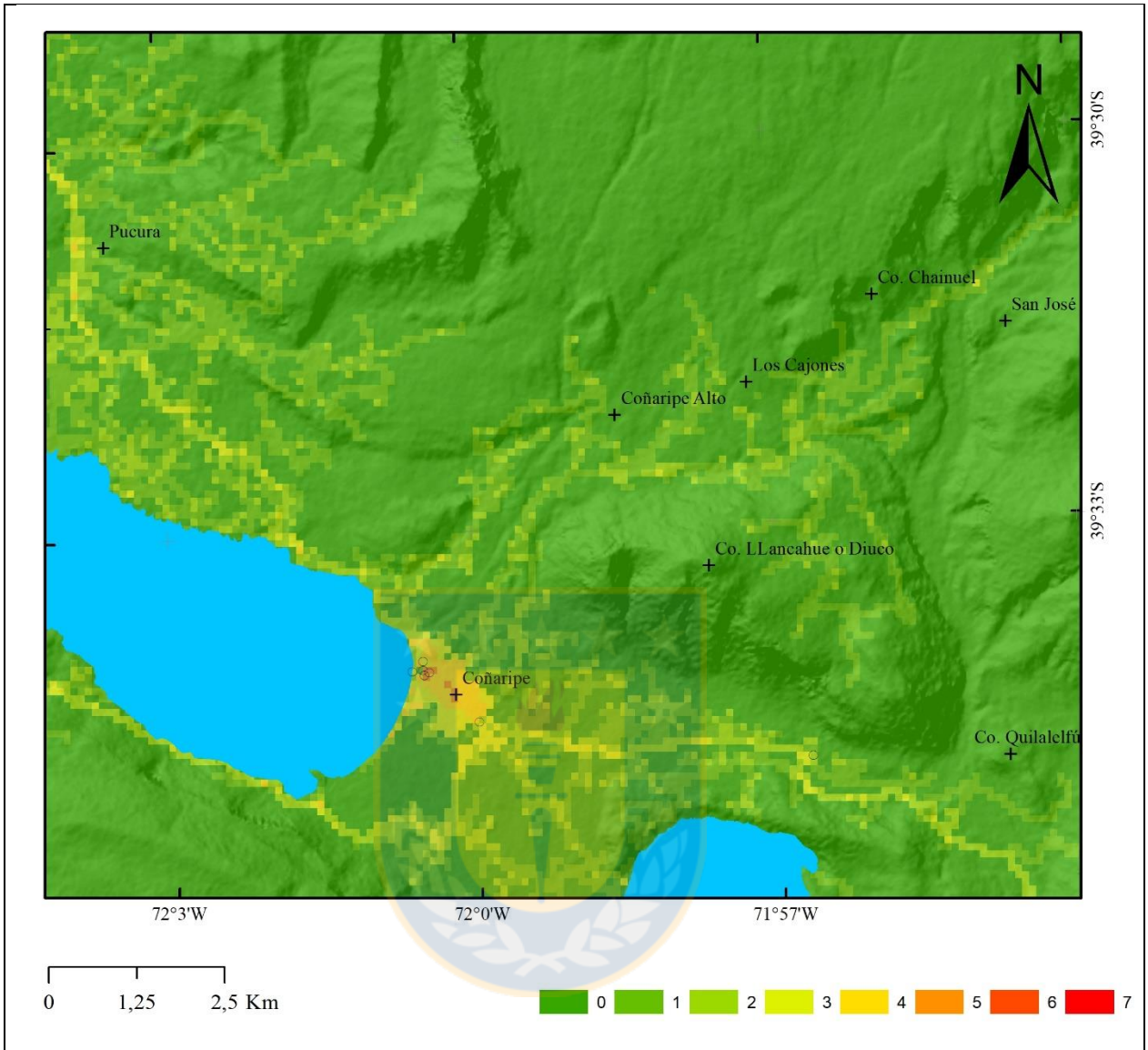


Figura 8: Mapa de grado de exposición máximo de Coñaripe. La leyenda representa el grado de exposición. En círculo se marcan la infraestructura y sitios críticos de turismo y servicio. Elaboración propia.

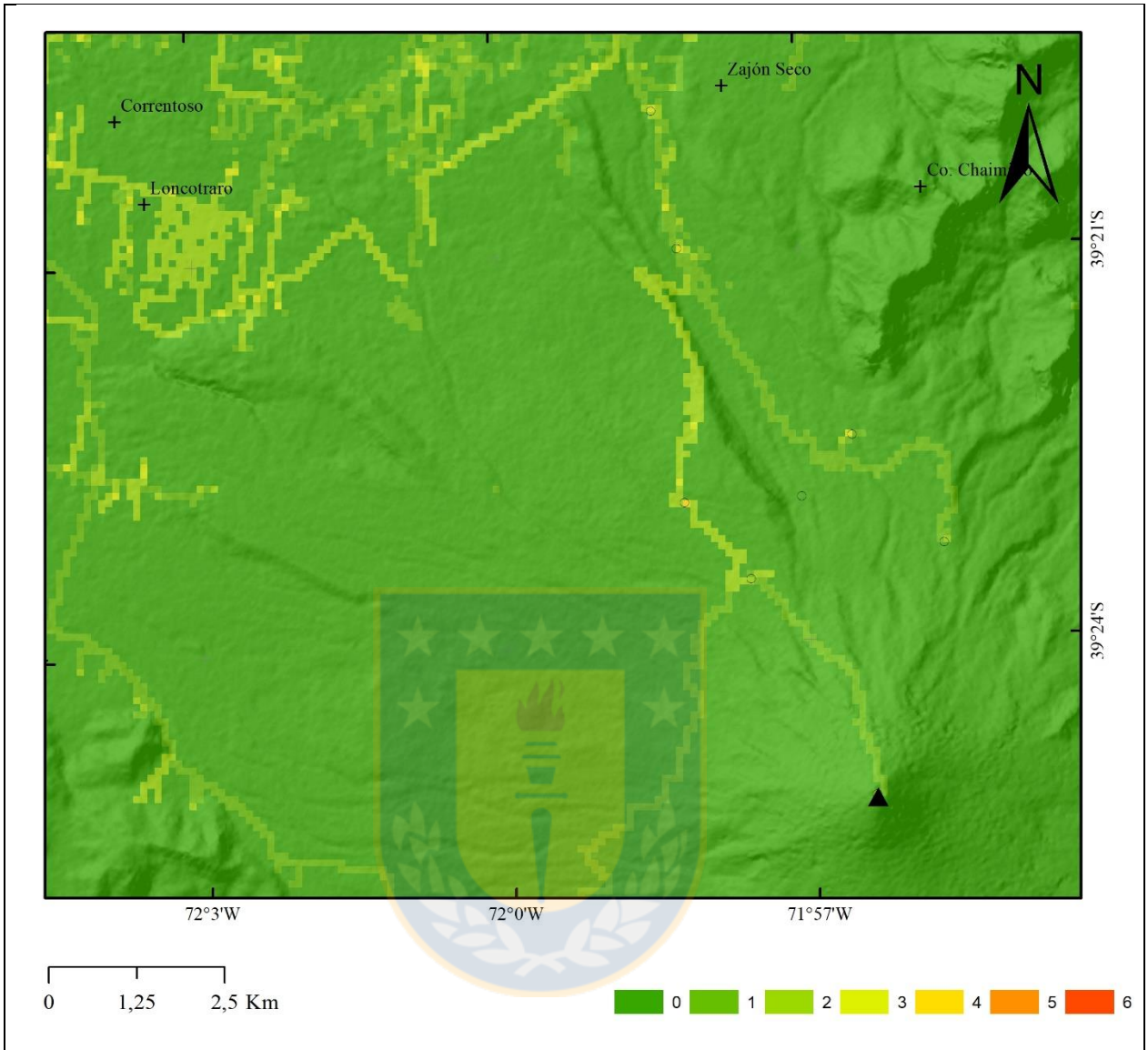


Figura 9: Mapa de grado de exposición mínimo de sector El Volcán. La leyenda representa el grado de exposición. En círculo se marcan la infraestructura y sitios críticos de turismo y servicio. Elaboración propia.

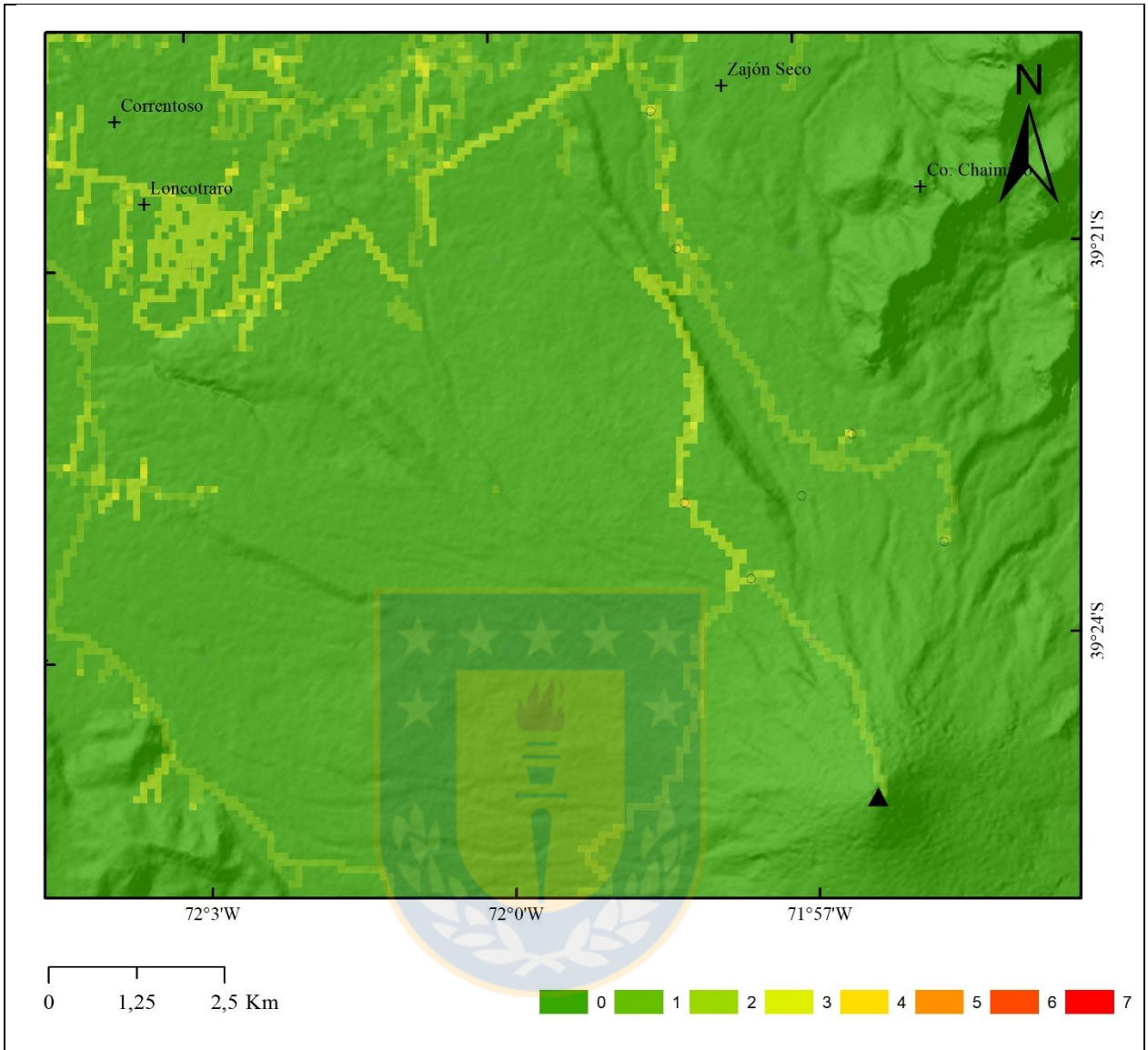


Figura 10: Mapa de grado de exposición máximo de sector El Volcán. La leyenda representa el grado de exposición. En círculo se marcan la infraestructura y sitios críticos de turismo y servicio. Elaboración propia.

ANEXO IV: BASE DE DATOS DE AMENAZA DEL VOLCÁN VILLARRICA

Tabla 1: Amenaza promedio del volcán Villarrica por entidades. La lista está ordenada alfabéticamente según el nombre de la localidad, se añaden los promedios de amenaza máxima por entidad (A), su desviación estándar (S), valor mínimo (Mi) y máximo (Ma). Se agrega su posición en el ranking (R). Elaboración propia.

Comuna	Localidad	Entidad	Categoría	Mi	Ma	A	S	R
VILLARRICA	AFUNALHUE	AFUNALHUE	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
VILLARRICA	AFUNALHUE	AFUNALHUE	Indeterminada	0	0	0	0	149
VILLARRICA	AFUNALHUE	CANIULEF	Com. Indígena	0	0	0	0	149
VILLARRICA	AFUNALHUE	FRANCISCO LLANCAFILO	Com. Indígena	0	0	0	0	149
VILLARRICA	AFUNALHUE	JOSE ANTINAO	Com. Indígena	0	0	0	0	149
VILLARRICA	AFUNALHUE	JOSE LUIS CANIULEF	Com. Indígena	0	0	0	0	149
VILLARRICA	AFUNALHUE	RAIPAN	Com. Indígena	0	0	0	0	149
VILLARRICA	AVIACION	AVIACION	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
VILLARRICA	AVIACION	EL SAUCE	Caserío	0	0	0	0	149
VILLARRICA	AVIACION	RINCONADA DE LLAU LLAU	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
VILLARRICA	AVIACION	VILLA AVIACION	Caserío	0	0	0	0	149
VILLARRICA	AVIACION	VILLA EL MONTE	Caserío	0	0	0	0	149
VILLARRICA	AVIACION	VILLA LOS MAITENES	Caserío	0	0	0	0	149
VILLARRICA	AVIACION	VOIPIR	Caserío	0	0	0	0	149
VILLARRICA	AVIACION SUR	AVIACION SUR	Indeterminada	0	0	0	0	149
VILLARRICA	AVIACION SUR	LOS MAITENES	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
PANGUIPULLI	BOCATOMA	LLINQUIHUE	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
PANGUIPULLI	BOCATOMA	LLONGAHUE	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
PUCON	CABURGUA	CABURGUA BAJO	Parcela-Hijuela	0	53	12	18	84
PUCON	CABURGUA	TRAUMACO	Parcela-Hijuela	0	107	19	27	56
PANGUIPULLI	CALAFQUEN	CALAFQUEN	Caserío	0	0	0	0	149
PANGUIPULLI	CALAFQUEN	CALAFQUEN	Fundo-Hacienda	0	0	0	0	149
PANGUIPULLI	CALAFQUEN	TRAILAFQUEN	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CALFUTUE	CALFUTUE	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CALFUTUE	FRANCISCO MARIN PAILLAN	Com. Indígena	0	0	0	0	149
PUCON	CANDELARIA	ALTO PUCON	Parcela de Agrado	0	125	31	35	36
PUCON	CANDELARIA	CALMAHUE	Fundo-Hacienda	0	151	46	43	24
PUCON	CANDELARIA	CANDELARIA	Parcela-Hijuela	0	364	27	51	41
PUCON	CANDELARIA	CANDELARIA	Indeterminada	0	188	18	44	62
PUCON	CANDELARIA	EL MIRADOR	Parcela de Agrado	0	226	83	70	6

Tabla 1 (continuación): Amenaza promedio del volcán Villarrica por entidades.

Comuna	Localidad	Entidad	Categoría	Mi	Ma	A	S	R
PUCON	CANDELARIA	MONTE LIBRE	Parcela de Agrado	63	63	63	0	12
PUCON	CARHUELLO	CARHUELLO	Fundo-Hacienda	0	53	18	21	61
PUCON	CARHUELLO	CARHUELLO	Indeterminada	0	188	7	18	116
PUCON	CARILEUFA	CARILEUFA	Indeterminada	0	80	19	24	59
PUCON	CARILEUFA	COLONIA ALEMANA	Parcela-Hijuela	0	80	17	22	64
PUCON	CARILEUFA	LIUCURA	Parcela-Hijuela	0	107	9	18	95
CURARREHUE	CATRIPULLI	ANGOSTURA	Parcela-Hijuela	0	112	10	23	92
CURARREHUE	CATRIPULLI	CABEDAÑA	Com. Indígena	0	112	19	32	60
CURARREHUE	CATRIPULLI	CARLOS SABUGAL RINCONADA	Fundo-Hacienda	0	112	13	29	81
CURARREHUE	CATRIPULLI	CASA DE LATA	Parcela-Hijuela	0	112	24	40	47
CURARREHUE	CATRIPULLI	CATRIPULLI	Aldea	0	186	57	51	17
CURARREHUE	CATRIPULLI	CATRIPULLI	Com. Indígena	0	112	13	25	80
CURARREHUE	CATRIPULLI	CORREO VIEJO	Parcela-Hijuela	0	112	15	25	73
CURARREHUE	CATRIPULLI	EL CARMEN CATRIPULLI	Fundo-Hacienda	0	75	11	27	87
CURARREHUE	CATRIPULLI	HUAMPOE ALTO	Com. Indígena	0	112	5	18	129
CURARREHUE	CATRIPULLI	HUAMPOE BAJO	Com. Indígena	0	112	16	30	70
CURARREHUE	CATRIPULLI	LONCOFILO	Com. Indígena	0	112	5	18	125
CURARREHUE	CATRIPULLI	SANTA ELENA ALTO	Parcela-Hijuela	0	112	8	19	104
CURARREHUE	CATRIPULLI	SANTA ELENA BAJO	Com. Indígena	0	112	14	32	77
PANGUIPULLI	CAYUMAPU	CAYUMAPU	Indeterminada	0	0	0	0	149
PANGUIPULLI	CAYUMAPU	JUAN CATRIPAN	Com. Indígena	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CHALLUPEN	AMBROSIO PUNOLEF	Com. Indígena	0	327	34	56	35
VILLARRICA	CHALLUPEN	CABAÑAS BANCO EDWARDS	Caserío	0	180	69	78	10
VILLARRICA	CHALLUPEN	CHALLUPEN	Indeterminada	0	180	20	43	54
VILLARRICA	CHALLUPEN	CHALLUPEN ALTO	Parcela-Hijuela	0	180	8	28	102
VILLARRICA	CHALLUPEN	FELIPE PUNOLEF	Com. Indígena	0	300	27	55	40
VILLARRICA	CHALLUPEN	LUCAS PAILLACAN	Com. Indígena	0	180	16	43	69
VILLARRICA	CHALLUPEN	MANUEL CURILEF	Com. Indígena	0	240	26	50	43
VILLARRICA	CHAURA	CHAURA ALTO	Com. Indígena	0	0	0	0	149

Tabla 1 (continuación): Amenaza promedio del volcán Villarrica por entidades.

Comuna	Localidad	Entidad	Categoría	Mi	Ma	A	S	R
VILLARRICA	CHAURA	CHAURA PALIHUE	Com. Indígena	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CHAURA	FELIPE PAILACURA	Com. Indígena	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CHAURA	JOSE MANUEL TROPAN	Com. Indígena	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CHAURA	NALCAHUE	Com. Indígena	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CHESQUE	CHESQUE ALTO	Parcela de Agrado	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CHESQUE	CHESQUE ALTO	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CHESQUE	JUAN CAYULEF	Com. Indígena	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CHESQUE	NALCAHUE	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CHESQUE BAJO	CHESQUE BAJO	Indeterminada	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CHESQUE BAJO	JUAN CAYULEF	Com. Indígena	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CHESQUE BAJO	MANUEL LEFIÑIR	Com. Indígena	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CHESQUE BAJO	PARQUE ECOLOGICO TRES ESTEROS	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CHIGUAICO	ANTONIO CANIULEF	Com. Indígena	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CHIGUAICO	ANTONIO PICHIPAN	Com. Indígena	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CHIGUAICO	CACIQUE LLANCAPAN	Com. Indígena	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CHIGUAICO	CHIGUAICO	Com. Indígena	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CHIGUAICO	CHIGUAICO	Indeterminada	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CHIGUAICO	CHIGUAICO OESTE	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CHIGUAICO	FELIPE CURINAO	Com. Indígena	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CHIGUAICO	LONCOPAN	Com. Indígena	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CHIGUAICO	MANUEL CURINAO	Com. Indígena	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CHIGUAICO	PEDRO CANIULAF	Com. Indígena	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CHIGUAICO	RAINAHUEL	Com. Indígena	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CHIGUAICO	SEGUNDO LLANQUINAO	Com. Indígena	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CHIGUAICO	TAÑI MAPU	Parcela de Agrado	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CHIGUAICO	TEODRO PAILACURA	Com. Indígena	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CHUCAUCO	CHUCAUCO	Indeterminada	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CHUCAUCO	CHUCAUCO	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149

Tabla 1 (continuación): Amenaza promedio del volcán Villarrica por entidades.

Comuna	Localidad	Entidad	Categoría	Mi	Ma	A	S	R
VILLARRICA	CHUCAUCO	IGNACIO YEVILAO	Com. Indígena	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CHUCAUCO	JOSE MANUEL NAHUELHUAL	Com. Indígena	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CHUCAUCO	NELTUME	Fundo-Hacienda	0	0	0	0	149
PUCON	COILACO	COILACO ALTO	Parcela-Hijuela	0	53	3	10	135
PUCON	COILACO	COILACO BAJO	Parcela-Hijuela	0	53	5	12	130
PUCON	COILACO	MARIA MILLANAO	Com. Indígena	0	53	6	13	122
PUCON	COILACO	QUIRRAQUIRRA	Parcela-Hijuela	0	27	1	4	145
VILLARRICA	COLLICO	COLLICO	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
VILLARRICA	COLLICO	COLLICO	Indeterminada	0	0	0	0	149
VILLARRICA	COLLICO	COLLICO BAJO	Caserío	0	0	0	0	149
VILLARRICA	COLLICO	COLLICO BAJO	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
VILLARRICA	COLLICO	FUTACOYAN	Fundo-Hacienda	0	0	0	0	149
VILLARRICA	COLLICO	LOS MAITENES DEL VOLCAN	Caserío	0	0	0	0	149
VILLARRICA	COLLICO	LOS NOTROS	Caserío	0	0	0	0	149
VILLARRICA	COLLICO	VILLA EDEN	Caserío	0	0	0	0	149
VILLARRICA	COLLICO	VILLA ENTRE RIOS	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
VILLARRICA	COLLICO	VILLA LOS PINOS	Caserío	0	0	0	0	149
VILLARRICA	COLLICO	VILLA LUISA	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
VILLARRICA	COLLICO	VILLA OREGON	Caserío	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CONQUIL	ANTONIO HUICHULEF	Com. Indígena	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CONQUIL	CANTO DEL VALLE	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CONQUIL	CONQUIL	Parcela-Hijuela	0	218	14	38	75
VILLARRICA	CONQUIL	CONQUIL	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CONQUIL	CONQUIL	Indeterminada	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CONQUIL	DE VILLA	Parcela de Agrado	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CONQUIL	DOMINGO PICHINAO	Com. Indígena	0	60	2	11	142
VILLARRICA	CONQUIL	EL REFUGIO	Fundo-Hacienda	0	64	0	5	147
VILLARRICA	CONQUIL	JOSE MIGUEL MANQUEPILLAN	Com. Indígena	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CONQUIL	JUAN HUINOLPAN	Com. Indígena	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CONQUIL	JUAN PUÑALEF	Com. Indígena	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CONQUIL	QUILENTUE	Fundo-Hacienda	0	180	9	30	97
VILLARRICA	CONQUIL	QUIÑELELFU	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149

Tabla 1 (continuación): Amenaza promedio del volcán Villarrica por entidades.

Comuna	Localidad	Entidad	Categoría	Mi	Ma	A	S	R
VILLARRICA	CONQUIL	RUFINO CAYULEF	Com. Indígena	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CONQUIL	SANTA ROSA	Parcela de Agrado	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CONQUIL	VILLA LAS ARAUCARIAS	Caserío	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CONQUIL	VILLA LOS AVELLANOS	Caserío	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CONQUIL	VILLA LOS HUALLES	Parcela de Agrado	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CONQUIL	VILLA LOS NOTROS	Caserío	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CONQUIL	VOIPIR	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
PANGUIPULLI	COÑARIPE	CAMINO INTERNACIONAL	Parcela-Hijuela	0	180	49	58	21
PANGUIPULLI	COÑARIPE	CARLOS ANTIMILLA	Com. Indígena	0	180	24	39	48
PANGUIPULLI	COÑARIPE	COÑARIPE	Indeterminada	0	300	61	86	14
PANGUIPULLI	COÑARIPE	LA MISION	Parcela-Hijuela	0	180	10	35	91
PANGUIPULLI	COÑARIPE	LINOICO	Parcela-Hijuela	0	120	0	7	146
PANGUIPULLI	COÑARIPE	PELLAIFA	Parcela-Hijuela	0	180	27	45	39
PANGUIPULLI	COÑARIPE	VILLA PUELICHE	Caserío	0	120	20	34	53
PANGUIPULLI	COÑARIPE	VILLA REUCAN	Caserío	0	210	25	48	45
PANGUIPULLI	COÑARIPE ALTO	CARLOS ANTIMILLA	Com. Indígena	0	169	9	26	98
PANGUIPULLI	COÑARIPE ALTO	COÑARIPE ALTO	Indeterminada	0	198	8	23	109
PANGUIPULLI	COÑARIPE ALTO	LA VERDE	Fundo-Hacienda	0	66	1	6	143
PANGUIPULLI	COÑARIPE ALTO	LOS CAJONES	Parcela-Hijuela	0	251	2	13	134
PANGUIPULLI	COÑARIPE ALTO	LOS CAJONES	Otros	0	125	3	15	140
PANGUIPULLI	COÑARIPE ALTO	PEHUENMAPU	Com. Indígena	0	130	5	20	128
PANGUIPULLI	COÑARIPE ALTO	PIRRENMAPU	Com. Indígena	0	120	13	27	82
PANGUIPULLI	COÑARIPE ALTO	RAYENMAPU	Com. Indígena	0	180	6	22	123
PANGUIPULLI	COZ COZ	CALAFQUEN	Fundo-Hacienda	0	0	0	0	149
PANGUIPULLI	COZ COZ	COZ COZ	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
PANGUIPULLI	COZ COZ	LA QUINTA	Fundo-Hacienda	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CRUZ BLANCA	CRUZ BLANCA	Indeterminada	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CUDICO	ALTO LOMAS DE CUDICO	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CUDICO	ALTOS DEL ARRAYAN	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CUDICO	CUDICO	Indeterminada	0	180	3	16	137
VILLARRICA	CUDICO	CUDICO	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CUDICO	CUDICO BAJO	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149

Tabla 1 (continuación): Amenaza promedio del volcán Villarrica por entidades.

Comuna	Localidad	Entidad	Categoría	Mi	Ma	A	S	R
VILLARRICA	CUDICO	JOSE LUIS CANIULEF	Com. Indígena	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CUDICO	JUAN CAYULEF	Com. Indígena	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CUDICO	LOS RADALES DE CUDICO	Caserío	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CUDICO	QUILANTOS	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CUDICO	QUINCO	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
VILLARRICA	CUDICO	VILLA EL BOSQUE	Caserío	0	0	0	0	149
PANGUIPULLI	CULAN	JOSE CALFULUAN	Com. Indígena	0	180	7	25	119
PANGUIPULLI	CURIHUE	CAHUINCUL	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
PANGUIPULLI	CURIHUE	CURIHUE	Indeterminada	0	0	0	0	149
PANGUIPULLI	CURIHUE	JOSE MARIA COLLINAO	Com. Indígena	0	0	0	0	149
PANGUIPULLI	CURIHUE	PUERTO CURIHUE	Parcela de Agrado	0	0	0	0	149
VILLARRICA	DALCACO	DALCACO	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
VILLARRICA	DALCACO	MANUEL ANTIMILLA	Com. Indígena	0	192	5	25	126
PUCON	EL CLARO	AEROPUERTO	Parcela de Agrado	0	251	17	41	65
PUCON	EL CLARO	EL CLARO	Caserío	0	313	42	74	28
PUCON	EL CLARO	EL CLARO	Indeterminada	0	196	12	34	86
PUCON	EL CLARO	EL SOL	Parcela de Agrado	0	188	50	64	20
PUCON	EL CLARO NORTE	EX BALSA QUELHUE	Parcela-Hijuela	0	188	44	65	26
PUCON	EL CLARO NORTE	EX BALSA QUELHUE	Parcela de Agrado	0	125	7	24	121
PUCON	EL CLARO NORTE	PUERTO PUCON	Parcela de Agrado	0	218	64	66	11
VILLARRICA	EL PARQUE	ALTAMIRA	Parcela de Agrado	0	0	0	0	149
VILLARRICA	EL PARQUE	ALTO PINAR	Parcela de Agrado	0	0	0	0	149
VILLARRICA	EL PARQUE	EL PARQUE	Parcela de Agrado	0	0	0	0	149
VILLARRICA	EL PARQUE	EL PARQUE	Indeterminada	0	0	0	0	149
VILLARRICA	EL PARQUE	EL REHUE	Parcela de Agrado	0	0	0	0	149
VILLARRICA	EL PARQUE	LAS ACHIRAS	Parcela de Agrado	0	0	0	0	149

Tabla 1 (continuación): Amenaza promedio del volcán Villarrica por entidades.

Comuna	Localidad	Entidad	Categoría	Mi	Ma	A	S	R
VILLARRICA	EL PARQUE	PUERTO PINAR	Caserío	0	0	0	0	149
VILLARRICA	EL SUEÑO	EL SUEÑO	Fundo-Hacienda	0	0	0	0	149
VILLARRICA	EL SUEÑO	EL SUEÑO	Indeterminada	0	0	0	0	149
VILLARRICA	EL SUEÑO	LA PUNTILLA DE NELTUME	Parcela de Agrado	0	0	0	0	149
VILLARRICA	EL TUME	EL TUME	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
PUCON	EL TURBIO	EL CERDUO	Parcela-Hijuela	0	174	3	18	133
PUCON	EL TURBIO	EL TURBIO	Parcela-Hijuela	0	188	35	55	18
PUCON	EL TURBIO	EL TURBIO	Indeterminada	0	196	55	71	32
PUCON	EL TURBIO	KAWE LLUKO	Fundo-Hacienda	0	226	35	59	34
PUCON	EL TURBIO	METREÑEHUE	Parcela-Hijuela	0	251	35	55	33
PUCON	EL TURBIO	TURBIO	Parcela-Hijuela	0	261	19	38	57
PUCON	EL VOLCAN	EL VOLCAN	Parcela-Hijuela	0	350	12	39	72
PUCON	EL VOLCAN	EL VOLCAN	Indeterminada	0	480	15	54	85
PUCON	EL VOLCAN	PASAJE ARRIAGADA	Parcela de Agrado	0	226	58	70	16
PUCON	EL VOLCAN	TURBINA ALTA	Parcela-Hijuela	0	196	48	74	22
VILLARRICA	HUALAPULLI	GREGORIO ALCAPAN	Com. Indígena	0	0	0	0	149
VILLARRICA	HUALAPULLI	GREGORIO ALCAPAN	Com. Indígena	0	0	0	0	149
VILLARRICA	HUALAPULLI	HUALAPULLI	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
VILLARRICA	HUALAPULLI	INALTU LEUFU	Com. Indígena	0	0	0	0	149
VILLARRICA	HUALAPULLI	JOSE CARIPANG	Com. Indígena	0	0	0	0	149
PUCON	HUIFE	HUIFE BAJO	Parcela-Hijuela	0	80	7	18	117
PUCON	HUIFE	TERMAS DE HUIFE	Parcela-Hijuela	0	107	11	20	89
VILLARRICA	HUIFQUENCO	HUIFQUENCO	Fundo-Hacienda	0	0	0	0	149
VILLARRICA	HUIFQUENCO	LO IBANEZ	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
VILLARRICA	HUIFQUENCO	SAN JOSE	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
VILLARRICA	HUIFQUENCO	SAN LEOPOLDO	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
VILLARRICA	HUINCACARA	FRANCISCO ALCAPAN Y LUCAS AGUILERA	Com. Indígena	0	192	16	41	67
VILLARRICA	HUINCACARA	HUINCACARA	Indeterminada	0	163	2	15	138
VILLARRICA	HUINCACARA	HUINCACARA NORTE	Parcela-Hijuela	0	218	26	53	42
VILLARRICA	HUINCACARA	HUINCACARA SUR	Parcela-Hijuela	0	210	13	33	78
VILLARRICA	HUINCACARA	HUINCACARA SUR	Parcela-Hijuela	0	192	11	35	88
VILLARRICA	HUINCACARA	VOIPIR SECO	Parcela-Hijuela	0	199	7	28	114

Tabla 1 (continuación): Amenaza promedio del volcán Villarrica por entidades.

Comuna	Localidad	Entidad	Categoría	Mi	Ma	A	S	R
VILLARRICA	HUINCACARA	WINQUILCO	Fundo-Hacienda	0	84	8	22	105
PANGUIPULLI	HUITAG	EPULAFQUEN	Parcela de Agrado	0	0	0	0	149
PANGUIPULLI	HUITAG	RELIN	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
VILLARRICA	INDETERMINADA	HUINCACARA	Indeterminada	0	0	0	0	149
VILLARRICA	LA PUNTILLA	LA PUNTILLA	Parcela de Agrado	0	0	0	0	149
VILLARRICA	LEFAN	LEFAN	Indeterminada	0	60	1	7	144
VILLARRICA	LEFAN	LEFAN	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
VILLARRICA	LEFAN	LEFAN	Indeterminada	0	0	0	0	149
VILLARRICA	LEFAN	LORENA	Parcela de Agrado	0	0	0	0	149
VILLARRICA	LICAN RAY	CLARA TROMIANTE	Com. Indígena	0	0	0	0	149
VILLARRICA	LICAN RAY	LICAN RAY	Indeterminada	0	180	8	31	111
VILLARRICA	LICAN RAY	PUTABLA	Caserío	0	0	0	0	149
VILLARRICA	LICAN RAY	PUTABLA	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
VILLARRICA	LICAN RAY	PUTABLA CINCO	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
VILLARRICA	LICAN RAY	REMIGIO CABRAPAN MANQUEL	Com. Indígena	0	0	0	0	149
VILLARRICA	LICAN RAY	RUDECINDO ANCALEF	Com. Indígena	0	0	0	0	149
VILLARRICA	LICAN RAY	RUDECINDO ANCALEF	Com. Indígena	0	0	0	0	149
VILLARRICA	LICAN RAY	VILLA EL CARMEN	Caserío	0	0	0	0	149
VILLARRICA	LIUMALLA	ALFONSO ALCAPAN	Com. Indígena	0	0	0	0	149
VILLARRICA	LIUMALLA	CRUZ BLANCA	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
VILLARRICA	LIUMALLA	FELIPE CAYUÑIR	Com. Indígena	0	0	0	0	149
VILLARRICA	LIUMALLA	FELIPE CAYUÑIR DOS	Com. Indígena	0	0	0	0	149
VILLARRICA	LIUMALLA	LIUMALLA CENTRO-KUIFI MAPU	Com. Indígena	0	0	0	0	149
VILLARRICA	LIUMALLA	TORIBIO NECULPAN	Com. Indígena	0	0	0	0	149
PUCON	LLAFENCO	LLAFENCO	Parcela-Hijuela	0	198	15	42	44
PUCON	LLAFENCO	LLAFENCO	Indeterminada	0	198	26	49	74
PANGUIPULLI	LLANCAHUE	LLANCAHUE	Indeterminada	0	180	8	26	110
PANGUIPULLI	LLANCAHUE BAJO	LOS AÑIQUES	Fundo-Hacienda	0	0	0	0	149

Tabla 1 (continuación): Amenaza promedio del volcán Villarrica por entidades.

Comuna	Localidad	Entidad	Categoría	Mi	Ma	A	S	R
VILLARRICA	LLAU LLAU	LLAU LLAU	Parcela de Agrado	0	0	0	0	149
VILLARRICA	LONCOTRARO	COUNTRY PUCON	Parcela de Agrado	0	188	37	57	31
VILLARRICA	LONCOTRARO	HUENEY	Parcela de Agrado	60	180	124	58	1
VILLARRICA	LONCOTRARO	LONCOTRARO	Caserío	0	300	45	71	25
VILLARRICA	LONCOTRARO	LONCOTRARO	Indeterminada	0	245	7	31	115
VILLARRICA	LONCOTRARO	LONCOTRARO ALTO	Parcela-Hijuela	0	188	14	40	76
VILLARRICA	LONCOTRARO	TORRELAGUNA	Fundo-Hacienda	0	188	20	46	52
VILLARRICA	LOS CANALES	LOS CANALES	Fundo-Hacienda	0	0	0	0	149
VILLARRICA	LOS GUINDOS	EL NOTRO	Parcela de Agrado	0	0	0	0	149
VILLARRICA	LOS GUINDOS	EL PELLIN	Parcela de Agrado	0	0	0	0	149
VILLARRICA	LOS GUINDOS	JUAN ANTONIO YAÑEZ	Com. Indígena	0	0	0	0	149
VILLARRICA	LOS GUINDOS	LOS CEREZOS	Caserío	0	0	0	0	149
VILLARRICA	LOS GUINDOS	LOS GUINDOS	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
VILLARRICA	LOS GUINDOS	LOS GUINDOS	Parcela de Agrado	0	0	0	0	149
VILLARRICA	LOS GUINDOS	LOS GUINDOS	Indeterminada	0	0	0	0	149
VILLARRICA	LOS GUINDOS	LOS GUINDOS NORTE	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
VILLARRICA	LOS GUINDOS	LOS GUINDOS SUR	Parcela de Agrado	0	0	0	0	149
VILLARRICA	LOS GUINDOS	MALLOCO LOLENCO	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
VILLARRICA	LOS GUINDOS	MALLOCO LOLENCO	Com. Indígena	0	0	0	0	149
VILLARRICA	LOS GUINDOS	PARQUE DEL LAGO	Parcela de Agrado	0	0	0	0	149
VILLARRICA	LOS GUINDOS	PEDRO HUISCA	Com. Indígena	0	0	0	0	149
VILLARRICA	LOS GUINDOS	RIO ESCONDIDO	Parcela de Agrado	0	0	0	0	149
VILLARRICA	LOS GUINDOS	SAN JORGE	Parcela de Agrado	0	0	0	0	149
PUCON	LOS NEVADOS	LOS NEVADOS	Parcela-Hijuela	0	198	8	27	108
PUCON	LOS RISCOS	LA CASCADA	Fundo-Hacienda	0	218	37	61	30
PUCON	LOS RISCOS	LOS RISCOS	Parcela de Agrado	0	314	23	48	49
PUCON	MENETUE	MENETUE	Parcela-Hijuela	0	112	8	18	101

Tabla 1 (continuación): Amenaza promedio del volcán Villarrica por entidades.

Comuna	Localidad	Entidad	Categoría	Mi	Ma	A	S	R
VILLARRICA	MOLCO	ANTULAFQUEN	Parcela de Agrado	0	120	5	24	127
VILLARRICA	MOLCO	LOS QUELTEHUES	Parcela de Agrado	0	0	0	0	149
VILLARRICA	MOLCO	MOLCO	Caserío	0	300	92	93	5
VILLARRICA	MOLCO	MOLCO	Parcela-Hijuela	0	320	29	68	38
VILLARRICA	MOLCO	MOLCO	Indeterminada	0	240	7	27	118
VILLARRICA	MOLCO	MOLCO ALTO	Parcela-Hijuela	0	327	39	60	29
VILLARRICA	MOLCO	MOLCO BAJO	Caserío	0	192	3	23	136
VILLARRICA	MOLCO	MOLCO MEDIO	Caserío	0	180	82	57	7
VILLARRICA	MOLCO	MOLCO OESTE	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
VILLARRICA	MOLCO	SAN FRANCISCO DE MOLCO ALTO	Parcela de Agrado	0	180	61	66	15
VILLARRICA	MOLCO	VILLA ITURRIETA	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
VILLARRICA	MOLCO	VILLA LAS VERTIENTES	Caserío	0	0	0	0	149
VILLARRICA	MOLCO	VILLA SALTOS DEL MOLCO	Caserío	0	128	4	20	132
PANGUIPULLI	ÑISOLEUFU	LINOICO	Com. Indígena	0	0	0	0	149
PANGUIPULLI	ÑISOLEUFU	ÑISOLEUFU	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
PUCON	PAILLACO	LA BARDA	Parcela-Hijuela	0	80	8	16	106
PUCON	PALGUIN	ELTIT	Fundo-Hacienda	0	66	2	12	139
PUCON	PALGUIN	LONCOFILO	Parcela-Hijuela	0	112	12	27	83
PUCON	PALGUIN	PALGUIN	Indeterminada	0	331	8	30	100
PUCON	PALGUIN	PALGUIN ALTO	Parcela-Hijuela	0	311	4	20	131
PUCON	PALGUIN	PARAISO ESCONDIDO	Parcela-Hijuela	0	156	10	34	93
PUCON	PICHARES	EL PALPAL	Parcela-Hijuela	0	53	2	8	141
PUCON	PICHARES	HUEPIL	Parcela-Hijuela	0	107	9	15	96
PUCON	PICHARES	JOSE MARIA AVILES	Com. Indígena	0	103	8	18	107
VILLARRICA	PICHILAFQUEN	EL PINAR	Parcela de Agrado	0	0	0	0	149
VILLARRICA	PICHILAFQUEN	LA PUNTILLA DE LONCOVACA	Parcela de Agrado	0	0	0	0	149
VILLARRICA	PICHILAFQUEN	LOS BOLDOS	Parcela de Agrado	0	0	0	0	149
VILLARRICA	PICHILAFQUEN	LOS HELECHOS	Parcela de Agrado	0	0	0	0	149
VILLARRICA	PIEDRA AMARILLA	DOS ENCINOS	Parcela de Agrado	0	0	0	0	149

Tabla 1 (continuación): Amenaza promedio del volcán Villarrica por entidades.

Comuna	Localidad	Entidad	Categoría	Mi	Ma	A	S	R
VILLARRICA	PIEDRA AMARILLA	PIEDRA AMARILLA	Indeterminada	0	0	0	0	149
VILLARRICA	PIEDRA AMARILLA	PUERTO PUCON	Parcela de Agrado	0	0	0	0	149
VILLARRICA	PIEDRA AMARILLA	SAN CARLOS	Parcela de Agrado	0	0	0	0	149
PANGUIPULLI	PILINHUE	HUENINCA	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
PANGUIPULLI	PILINHUE	PILINHUE	Parcela-Hijuela	0	60	0	1	148
VILLARRICA	PINO GUACHO	PINO GUACHO	Parcela-Hijuela	0	253	7	29	113
PANGUIPULLI	PITREN	CERRO PITREN	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
PANGUIPULLI	PITREN	FILUCO	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
PANGUIPULLI	PITREN	LA PUNTILLA	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
VILLARRICA	PLAYA LINDA	PLAYA LINDA	Indeterminada	0	0	0	0	149
VILLARRICA	PLAYA LINDA	VALLELAFQUEN	Parcela de Agrado	0	0	0	0	149
PANGUIPULLI	POSDAHUE	COZ COZ	Com. Indígena	0	0	0	0	149
PANGUIPULLI	POSDAHUE	CURIHUENO	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
PANGUIPULLI	POSDAHUE	JOSE MANUEL QUECHUPAN NEGUIPAN	Com. Indígena	0	0	0	0	149
PANGUIPULLI	POSDAHUE	MANUEL QUECHUPAN	Com. Indígena	0	0	0	0	149
PANGUIPULLI	POSDAHUE	MARIPAN	Com. Indígena	0	0	0	0	149
PANGUIPULLI	POSDAHUE	NEIHUAL	Com. Indígena	0	0	0	0	149
PUCON	PUCON	PUCON	Indeterminada	0	439	62	102	13
PANGUIPULLI	PUCURA	CHALLUPEN	Caserío	0	245	22	39	50
PANGUIPULLI	PUCURA	LLUNCURA	Parcela-Hijuela	0	210	71	66	9
PANGUIPULLI	PUCURA	LLUNCURA	Com. Indígena	0	210	29	50	37
PANGUIPULLI	PUCURA	LLUNCURA	Caserío	0	210	15	43	71
PANGUIPULLI	PUCURA	PUCURA	Caserío	0	180	18	36	63
PANGUIPULLI	PUCURA	PUCURA ALTO	Com. Indígena	0	240	13	33	79
VILLARRICA	PUERTA DEL SOL	EL PORTAL DE LA VILLARRICA	Parcela de Agrado	0	0	0	0	149
VILLARRICA	PUERTA DEL SOL	JARDINES DE VILLARRICA	Parcela de Agrado	0	0	0	0	149
VILLARRICA	PUERTA DEL SOL	LAS LOMAS DE VILLARRICA	Parcela de Agrado	0	0	0	0	149
VILLARRICA	PUERTA DEL SOL	PUERTA DEL SOL	Parcela de Agrado	0	0	0	0	149
VILLARRICA	PUERTA DEL SOL	PUERTA DEL SOL	Indeterminada	0	0	0	0	149
VILLARRICA	PUERTA DEL SOL	SAN GERONIMO	Fundo-Hacienda	0	0	0	0	149
PANGUIPULLI	PULLINQUE	LONCO CHIGUAICURA	Com. Indígena	0	0	0	0	149

Tabla 1 (continuación): Amenaza promedio del volcán Villarrica por entidades.

Comuna	Localidad	Entidad	Categoría	Mi	Ma	A	S	R
PANGUIPULLI	PULLINQUE	PULLINQUE	Indeterminada	0	0	0	0	149
PANGUIPULLI	PULLINQUE	PULLINQUE	Indeterminada	0	0	0	0	149
VILLARRICA	PUTAE	DON ENRIQUE	Parcela de Agrado	0	0	0	0	149
VILLARRICA	PUTAE	LOS ARRAYANES PUTAE BAJO	Parcela de Agrado	0	0	0	0	149
VILLARRICA	PUTAE	LOS CEREZOS	Parcela de Agrado	0	0	0	0	149
VILLARRICA	PUTAE	LOS NOTROS DE PUTAE	Parcela de Agrado	0	0	0	0	149
VILLARRICA	PUTAE	PUTAE BAJO	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
VILLARRICA	PUTAE	RIO AZUL	Parcela de Agrado	0	0	0	0	149
PUCON	QUELHUE	MANUEL HUIQUIVIR	Com. Indígena	0	313	9	33	94
PUCON	QUELHUE	QUELHUE	Indeterminada	0	0	0	0	149
PUCON	QUETROLEUFU	ECO PARQUE	Parcela de Agrado	0	80	48	21	23
PUCON	QUETROLEUFU	MARIANO MILLAHUAL	Com. Indígena	0	188	54	61	19
PUCON	QUETROLEUFU	NORTE TOPATER	Parcela de Agrado	0	53	7	13	120
PUCON	QUETROLEUFU	QUETROLEUFU	Indeterminada	0	125	7	22	58
PUCON	QUETROLEUFU	QUETROLEUFU	Parcela de Agrado	0	188	19	35	112
PUCON	QUETROLEUFU	TRUFULCO	Parcela de Agrado	0	207	19	39	55
PUCON	QUILACO	MARIMAN	Fundo-Hacienda	0	63	10	23	90
PUCON	QUILACO	QUILACO	Parcela de Agrado	0	132	8	24	51
PUCON	QUILACO	QUILACO	Indeterminada	0	125	20	42	103
PANGUIPULLI	RAGUINTULELFA	RAGUINTULELFA	Com. Indígena	0	0	0	0	149
PUCON	SAN LUIS	SAN LUIS	Parcela-Hijuela	0	186	16	28	66
VILLARRICA	SEGUNDA FAJA AL VOLCAN	LOMAS DE LOS GUINDOS	Parcela de Agrado	0	0	0	0	149
VILLARRICA	SEGUNDA FAJA AL VOLCAN	SANTA MACARENA	Parcela de Agrado	0	0	0	0	149
VILLARRICA	SEGUNDA FAJA AL VOLCAN	SANTA TERESA DE LLAU LLAU	Fundo-Hacienda	0	0	0	0	149
VILLARRICA	SEGUNDA FAJA AL VOLCAN	SEGUNDA FAJA AL VOLCAN	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
VILLARRICA	SEGUNDA FAJA AL VOLCAN	SEGUNDA FAJA AL VOLCAN	Indeterminada	0	0	0	0	149

Tabla 1 (continuación): Amenaza promedio del volcán Villarrica por entidades.

Comuna	Localidad	Entidad	Categoría	Mi	Ma	A	S	R
PANGUIPULLI	TRAITRAICO	JUAN CARIPAN	Com. Indígena	0	180	25	41	46
PANGUIPULLI	TRAITRAICO	TRAITRAICO BAJO	Parcela de Agrado	0	240	8	32	99
PANGUIPULLI	TRALAHUAPI	TRENG TRENG MAPU	Com. Indígena	0	0	0	0	149
PANGUIPULLI	TRALCAPULLI	TRALCAPULLI	Parcela-Hijuela	0	0	0	0	149
PANGUIPULLI	TRALCAPULLI	TRALCAPULLI	Com. Indígena	0	0	0	0	149
PANGUIPULLI	TREGUA	TREGUA	Fundo-Hacienda	0	0	0	0	149
VILLARRICA	VIDA NUEVA	PUERTA DEL BOSQUE	Parcela de Agrado	0	0	0	0	149
VILLARRICA	VILLA JULIA	CHOSCO ALTO	Caserío	0	240	120	64	2
VILLARRICA	VILLA JULIA	CHOSCO ALTO	Parcela-Hijuela	0	180	74	68	8
VILLARRICA	VILLA JULIA	HOTEL VILLARRICA PARK LAKE	Otros	0	240	5	31	124
VILLARRICA	VILLA JULIA	PARQUE COINCO	Parcela-Hijuela	0	180	94	91	4
VILLARRICA	VILLA JULIA	VILLA JULIA	Caserío	0	240	16	53	2
VILLARRICA	VILLA JULIA	VILLA JULIA	Parcela-Hijuela	0	180	120	104	68
PUCON	VILLA SAN PEDRO	VILLA SAN PEDRO	Indeterminada	0	207	43	69	27
VILLARRICA	VILLARRICA	VILLARRICA	CD	0	0	0	0	149
VILLARRICA	VOIPIR	CURACO	Fundo-Hacienda	0	0	0	0	149
VILLARRICA	VOIPIR	SANTA MAGDALENA	Fundo-Hacienda	0	0	0	0	149
VILLARRICA	VOIPIR	VOIPIR	Indeterminada	0	0	0	0	149

ANEXO V: MAPAS DE DETALLE DE LA AMENAZA MÁXIMA DEL VOLCÁN VILLARRICA

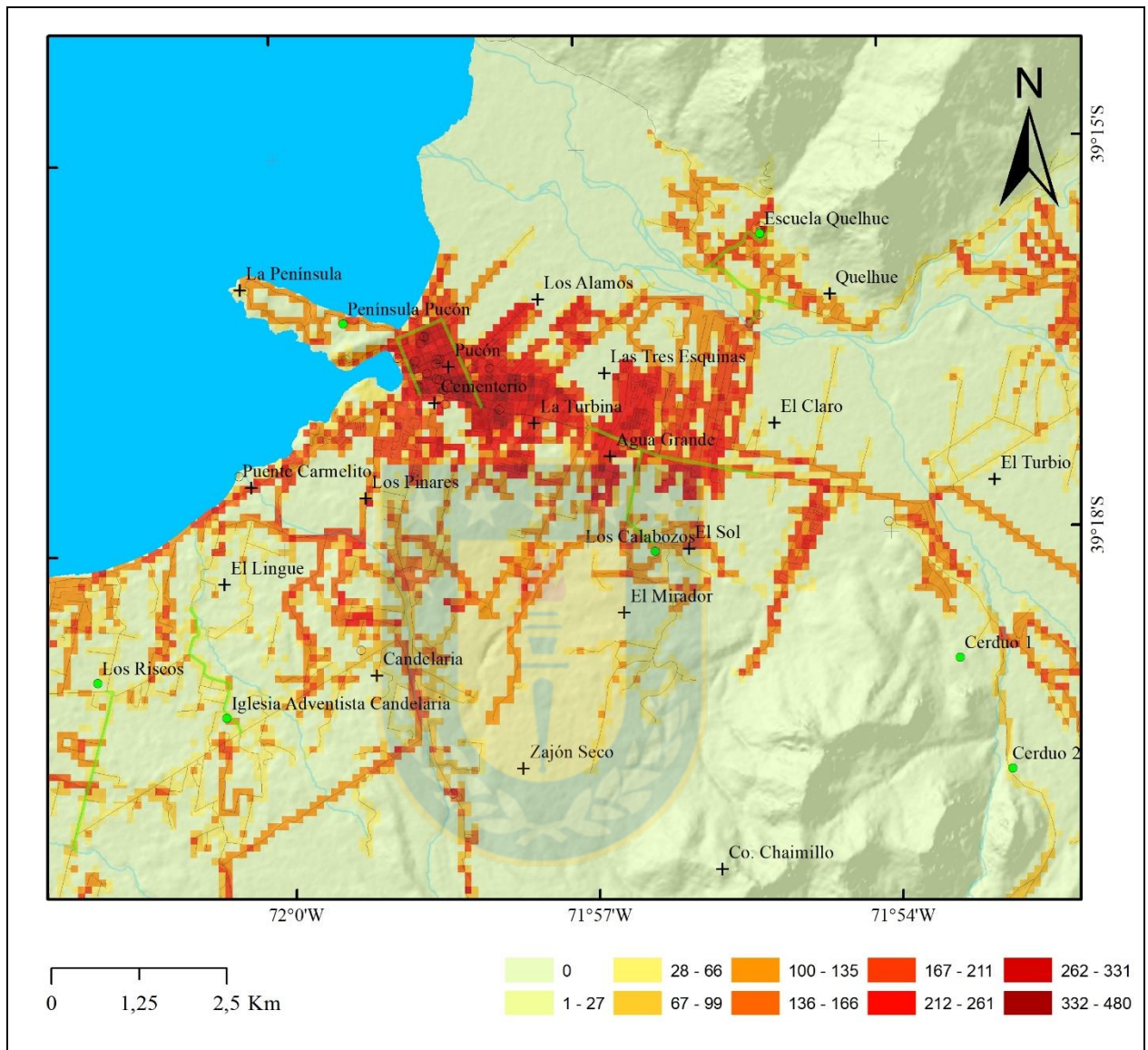


Figura 1: Mapa de amenaza máxima del volcán Villarrica de Pucón. La leyenda representa el grado de amenaza máxima. Puntos de encuentro (círculos verdes). Vías de evacuación (líneas verdes). Rutas (líneas grises). Infraestructura y sitios críticos (círculos). Cuerpos de agua (celeste).

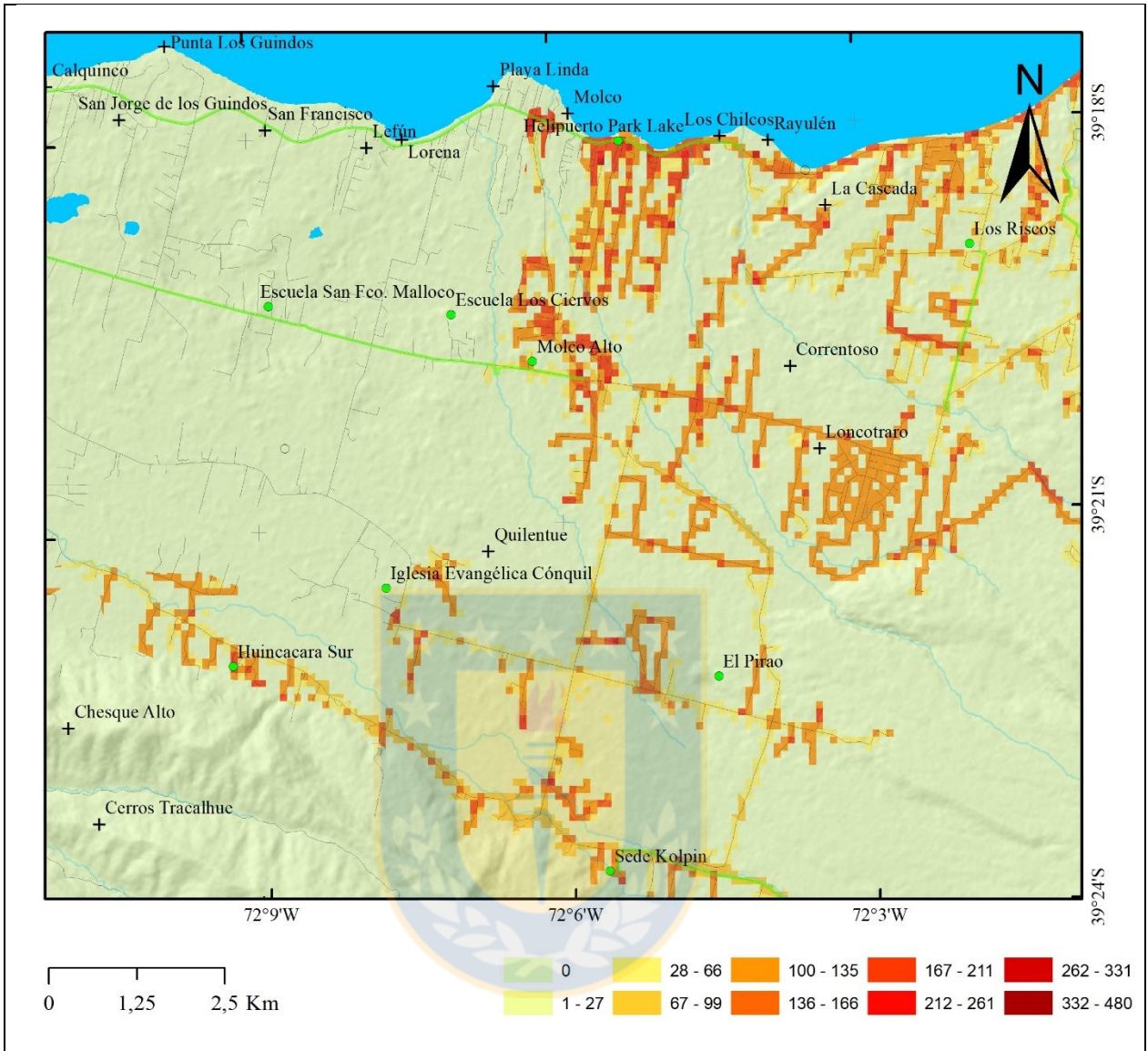


Figura 2: Mapa de amenaza máxima del volcán Villarrica de sectores entre Huincacara y Molco. La leyenda representa el grado de amenaza máxima. Puntos de encuentro (círculos verdes). Vías de evacuación (líneas verdes). Rutas (líneas grises). Infraestructura y sitios críticos (círculos). Cuerpos de agua (celeste).

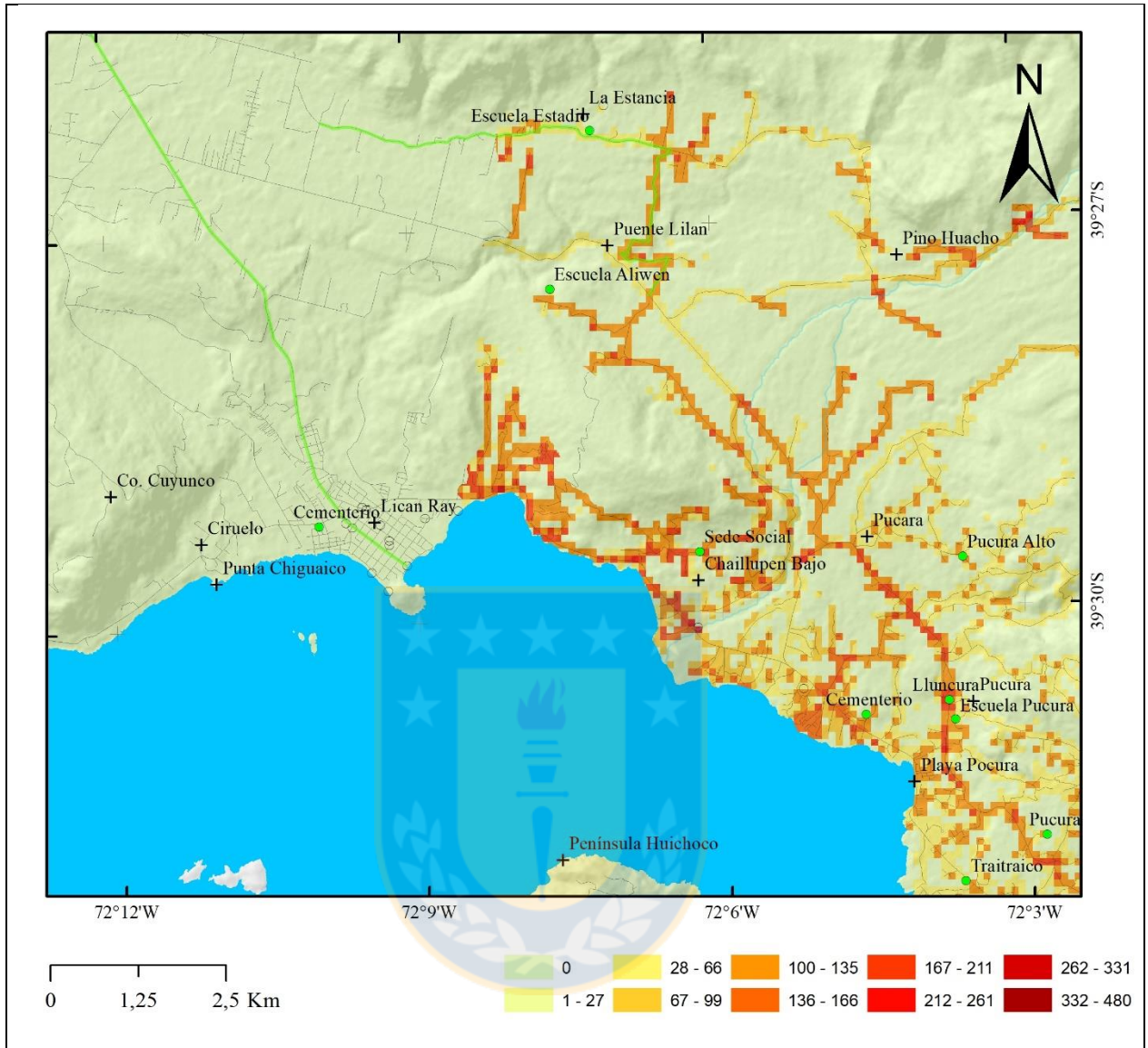


Figura 3: Mapa de amenaza máxima del volcán Villarrica de Licán Ray. La leyenda representa el grado de amenaza máxima. Puntos de encuentro (círculos verdes). Vías de evacuación (líneas verdes). Rutas (líneas grises). Infraestructura y sitios críticos (círculos). Cuerpos de agua (celeste).

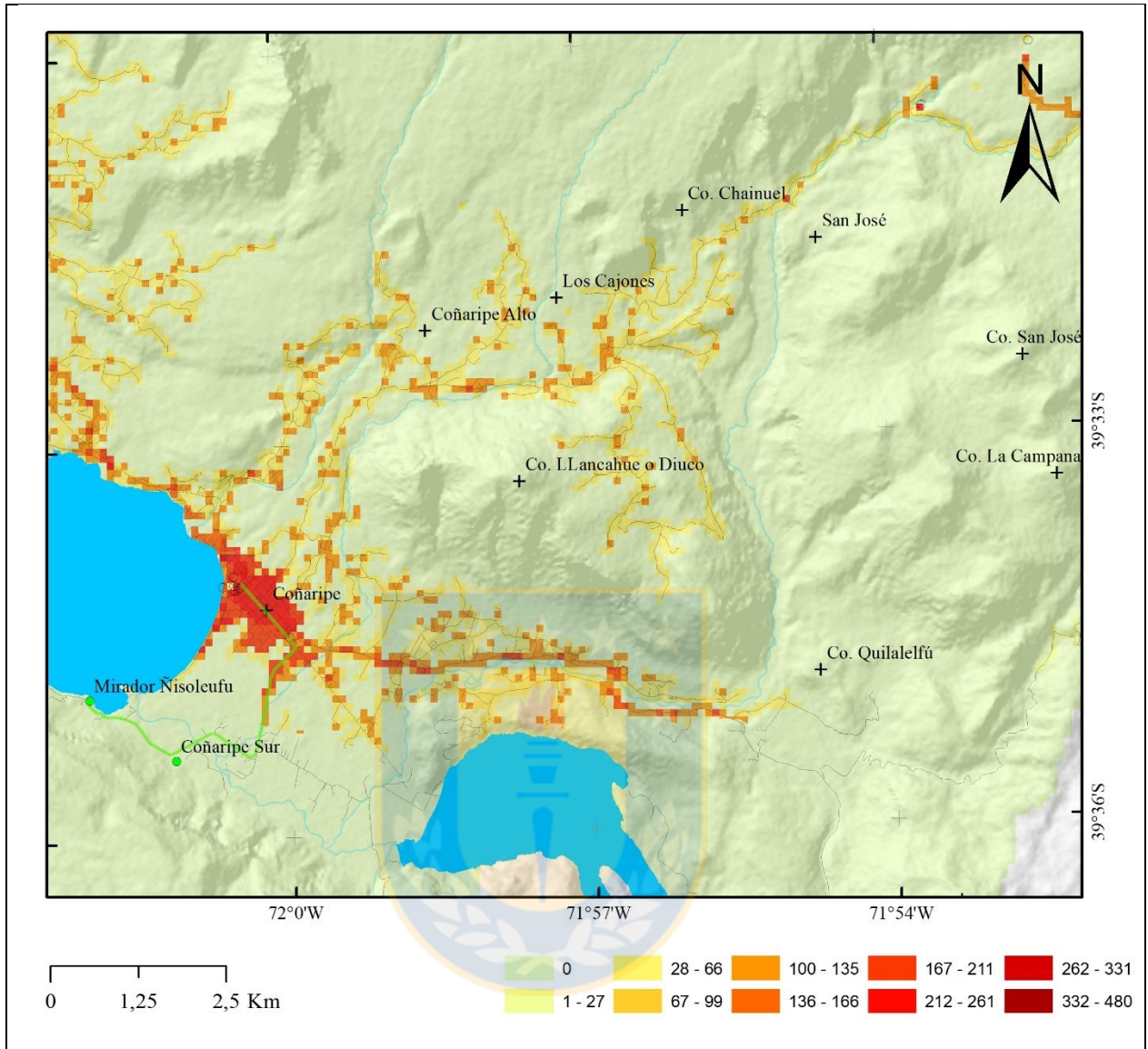


Figura 4: Mapa de amenaza máxima del volcán Villarrica de Coñaripe. La leyenda representa el grado de amenaza máxima. Puntos de encuentro (círculos verdes). Vías de evacuación (líneas verdes). Rutas (líneas grises). Infraestructura y sitios críticos (círculos). Cuerpos de agua (celeste).

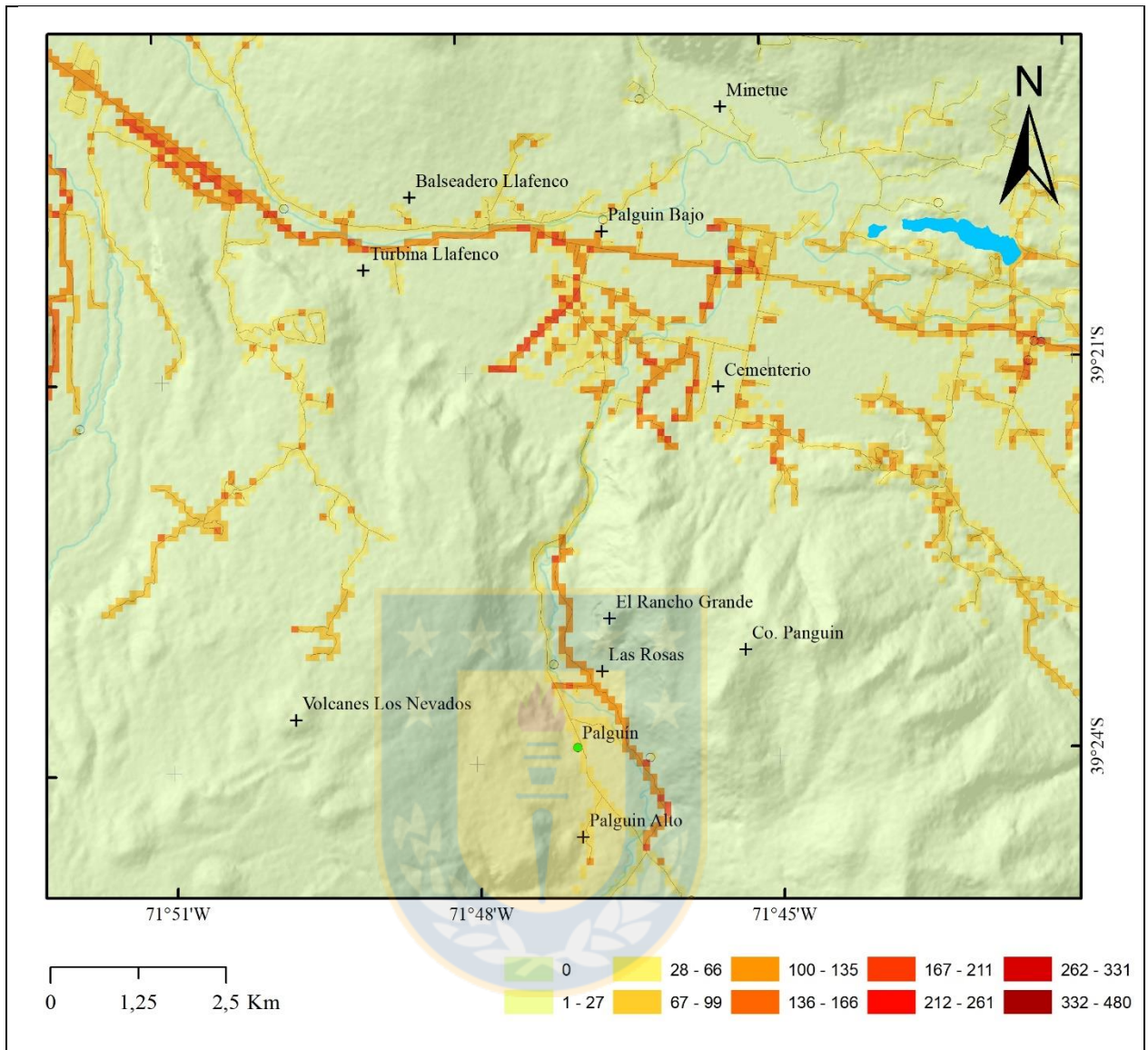


Figura 5: Mapa de amenaza máxima del volcán Villarrica de Palguín. La leyenda representa el grado de amenaza máxima. Puntos de encuentro (círculos verdes). Vías de evacuación (líneas verdes). Rutas (líneas grises). Infraestructura y sitios críticos (círculos). Cuerpos de agua (celeste).

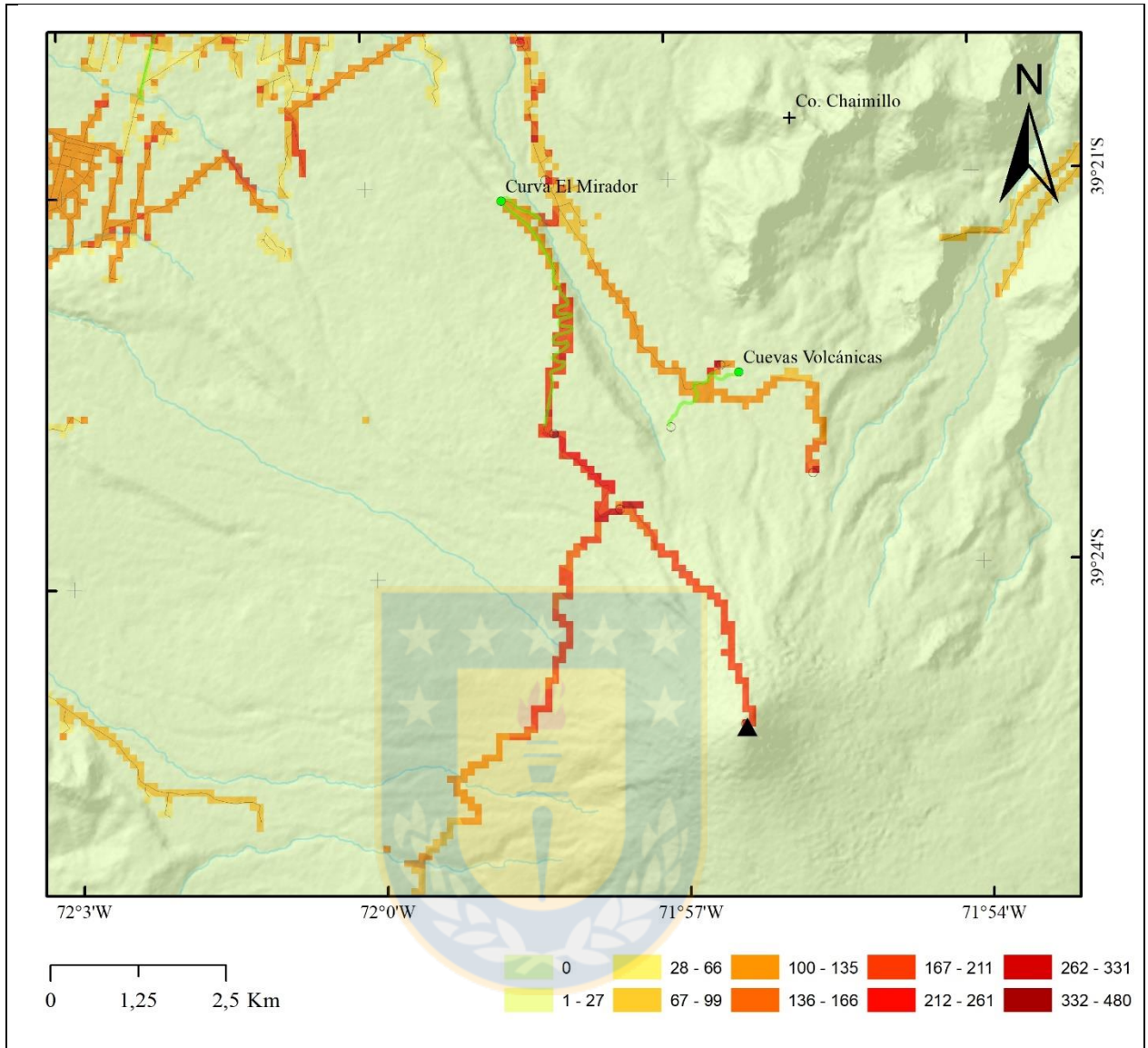


Figura 6: Mapa de amenaza máxima del volcán Villarrica de sector El Volcán. La leyenda representa el grado de amenaza máxima. Puntos de encuentro (círculos verdes). Vías de evacuación (líneas verdes). Rutas (líneas grises). Infraestructura y sitios críticos (círculos) Cuerpos de agua (celeste).

ANEXO VI: MATERIAL UTILIZADO PARA EL ESTUDIO DE USABILIDAD INCORPORANDO TECNOLOGÍA DE SEGUIMIENTO OCULAR

DOCUMENTO DE CONSENTIMIENTO INFORMADO PARA EJERCICIO EXPERIMENTAL Y CUESTIONARIO

Usted ha sido invitado a participar en un **Estudio de Usabilidad Incorporando Tecnología de Seguimiento Ocular** realizado por Alfredo Rivas Vergara, estudiante memorista de Geología de la Universidad de Concepción a cargo del profesor guía Dr. José Palma Lizana. El objeto de esta carta es ayudarlo a tomar la decisión de participar en la presente investigación.

¿En qué consiste su participación?

Si usted está de acuerdo, participará en un ejercicio experimental, donde usted se sentará frente a una pantalla mientras sigue las instrucciones descritas en la pantalla, luego responderá un cuestionario.

¿Cuánto durará su participación?

Realizar el experimento y contestar el cuestionario pueden tomar aproximadamente 10 minutos.

¿Qué riesgo corre usted al participar?

No existe ningún riesgo asociado al realizar el experimento y el cuestionario, ya que la información entregada es completamente confidencial.

¿Qué beneficios puede tener su participación?

Su participación beneficiará a la comunidad puesto que el objetivo es generar mapas que sean más fáciles de comprender y acorde a sus necesidades.

¿Qué pasa con la información y datos que usted entregue?

Los investigadores a cargo mantendrán completa CONFIDENCIALIDAD con respecto a cualquier información obtenida en este estudio. Para ello los cuestionarios son anónimos.

¿Es obligación participar? ¿Puede arrepentirse después de participar?

Usted NO está obligado de ninguna manera a participar en este estudio. Si accede a participar, puede dejar de hacerlo en cualquier momento sin repercusión alguna.

¿A quién puede contactar para saber más de este estudio o si le surgen dudas?

Si tiene cualquier pregunta acerca de esta investigación, puede contactar a Alfredo Rivas, teléfono +56966562821, email: alfredorivas@udec.cl.

_____	_____
Nombre del Participante	Firma del Participante
_____	_____
Nombre del Examinador	Firma del Examinador

Figura 1: Documento impreso de consentimiento informado. Información entregada a los participantes.

CUESTIONARIO: Marque con una X la respuesta por encima de la línea que sigue a la alternativa
 Hombre __ Mujer __ Edad __ Vivo alrededor del volcán Villarrica: **Sí** __ **No** __

1. ¿Cree que el volcán Villarrica podría hacer erupción otra vez? Sí _ No _ No sé _	15. ¿Tiene implementos de seguridad para protegerse de la ceniza volcánica? Sí _ No _
2. ¿Las erupciones pueden ser pronosticadas con exactitud? Sí _ No _ No sé _	16. ¿Confía en las autoridades estatales y gubernamentales como la intendencia regional, la municipalidad de Pucón, carabineros, etc.? Sí _ No _
3. ¿Los lahares son similares a los aluviones? Sí _ No _ No sé _	17. ¿Confía en las autoridades técnicas como el SERNAGEOMIN y la ONEMI? Sí _ No _
4. ¿En caso de erupción del volcán Villarrica sabe cuál sería una zona segura dentro del Parque Nacional Villarrica? Sí _ No _	18. ¿Confía en organizaciones de seguridad privada como bomberos, seguridad civil, CONAF, etc.? Sí _ No _
5. ¿Conocía de antes el mapa de peligros del volcán Villarrica elaborado por SERNAGEOMIN? Sí _ No _	19. ¿En caso de erupción se verá afectado en este lugar? Sí _ No _ No sé _
6. ¿En caso de erupción es mejor acercarse a los ríos? Sí _ No _ No sé _	20. ¿Las erupciones son comunes en el volcán Villarrica? Sí _ No _ No sé _
7. ¿Ha sufrido los impactos de una erupción volcánica (en cualquier lugar)? Sí _ No _	21. ¿Una erupción puede ser controlada? Sí _ No _ No sé _
8. ¿Ha participado en alguna evacuación ante emergencia volcánica (en cualquier lugar)? Sí _ No _	22. ¿Se siente preparado para enfrentar una erupción? Sí _ No _
9. ¿Ha participado en algún taller, feria, charla o capacitación asociada a emergencias volcánicas? Sí _ No _	23. En caso de alarma de erupción y aviso de evacuación, ¿prefiere quedarse donde está a esperar qué ocurre? Sí _ No _
10. ¿Su estudio o trabajo involucra el uso de mapas cartográficos? Sí _ No _	24. En caso de erupción, ¿se acercaría a la cumbre del volcán para observar lo que ocurre? Sí _ No _
11. ¿Su estudio o trabajo involucra conocimientos en volcanes? Sí _ No _	25. ¿La capacidad de respuesta (coordinación entre municipio, ONEMI, SERNAGEOMIN, Carabineros, etc.) es suficiente para enfrentar una crisis actualmente? Sí _ No _
12. ¿Su estudio o trabajo involucra conocimientos en seguridad y emergencias? Sí _ No _	26. ¿Considera adecuado que en los alrededores del volcán siga poblándose? Sí _ No _
13. ¿Tiene un plan con su familia en caso de erupción? Sí _ No _	
14. ¿Tiene un contacto de emergencia en caso de una evacuación? Sí _ No _	
27. El mapa es fácil de interpretar	— — — — —
28. Las descripciones de la leyenda son fáciles de entender	— — — — —
29. Las descripciones de la informaciones o glosario son fáciles de entender	— — — — —
30. Logro localizarme bien en el mapa	— — — — —
31. Me parece útil el mapa para conocer acerca de los peligros volcánicos y sus extensiones	— — — — —
32. Me parece útil el mapa para saber cuales son las zonas de seguridad	— — — — —
33. Me parece útil el mapa para saber qué hacer durante una erupción en el volcán Villarrica	— — — — —
34. Recomendaría a un familiar suyo usar este mapa de peligro volcánico	— — — — —

Figura 2: Cuestionario impreso de percepción y satisfacción. Cuestionario entregado a los participantes.

ANEXO VII: MAPAS DE ATENCIÓN VISUAL PARA EL ANÁLISIS DE SEGUIMIENTO OCULAR

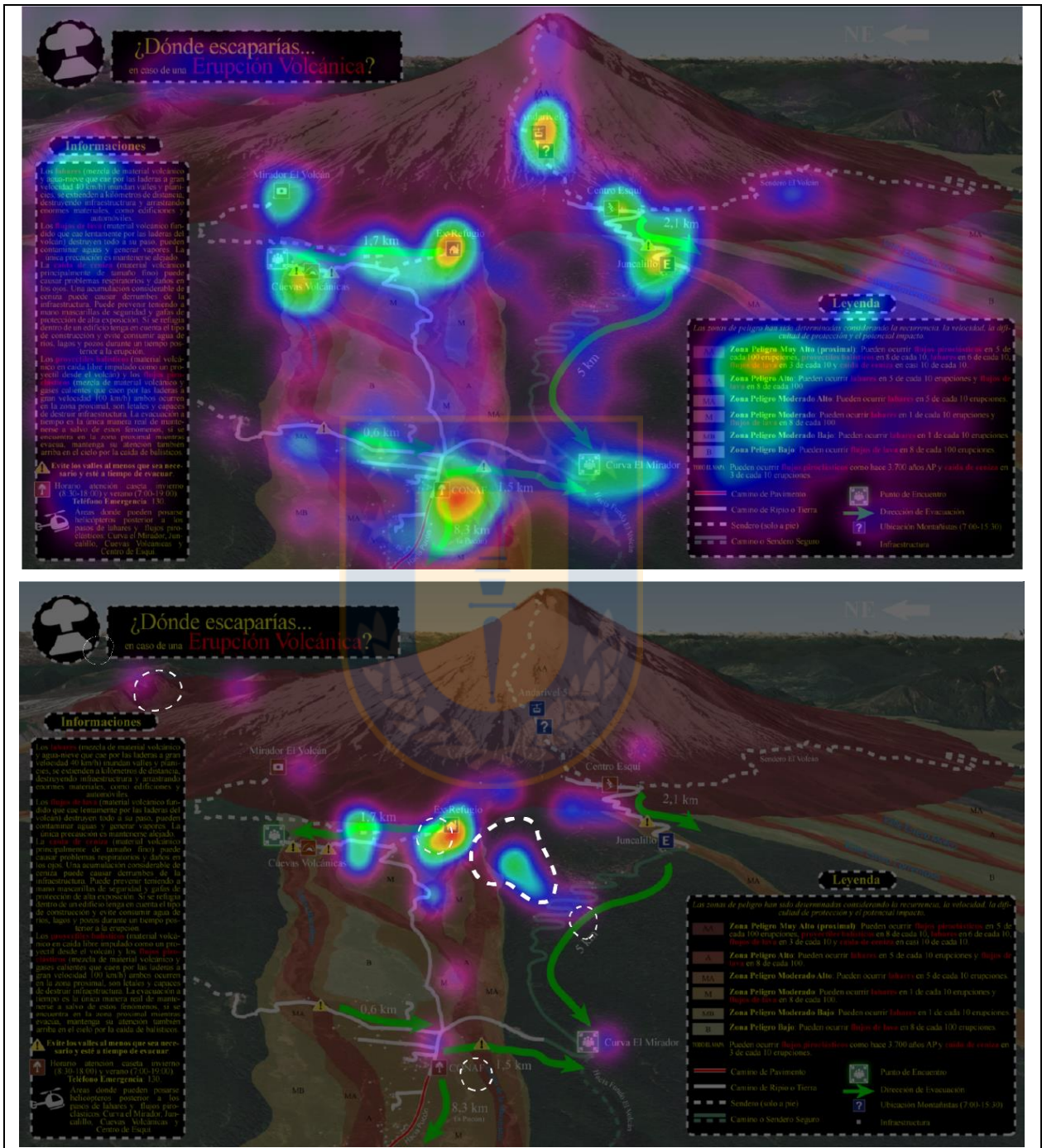


Figura 1: Mapa de atención visual general del diseño propio. Arriba, el mapa de la cantidad total de fijaciones y, abajo, el mapa de la primera y segunda fijación. En líneas discontinuas se muestran las primeras fijaciones. Colores cálidos y líneas de mayor grosor representan mayor densidad de fijaciones.

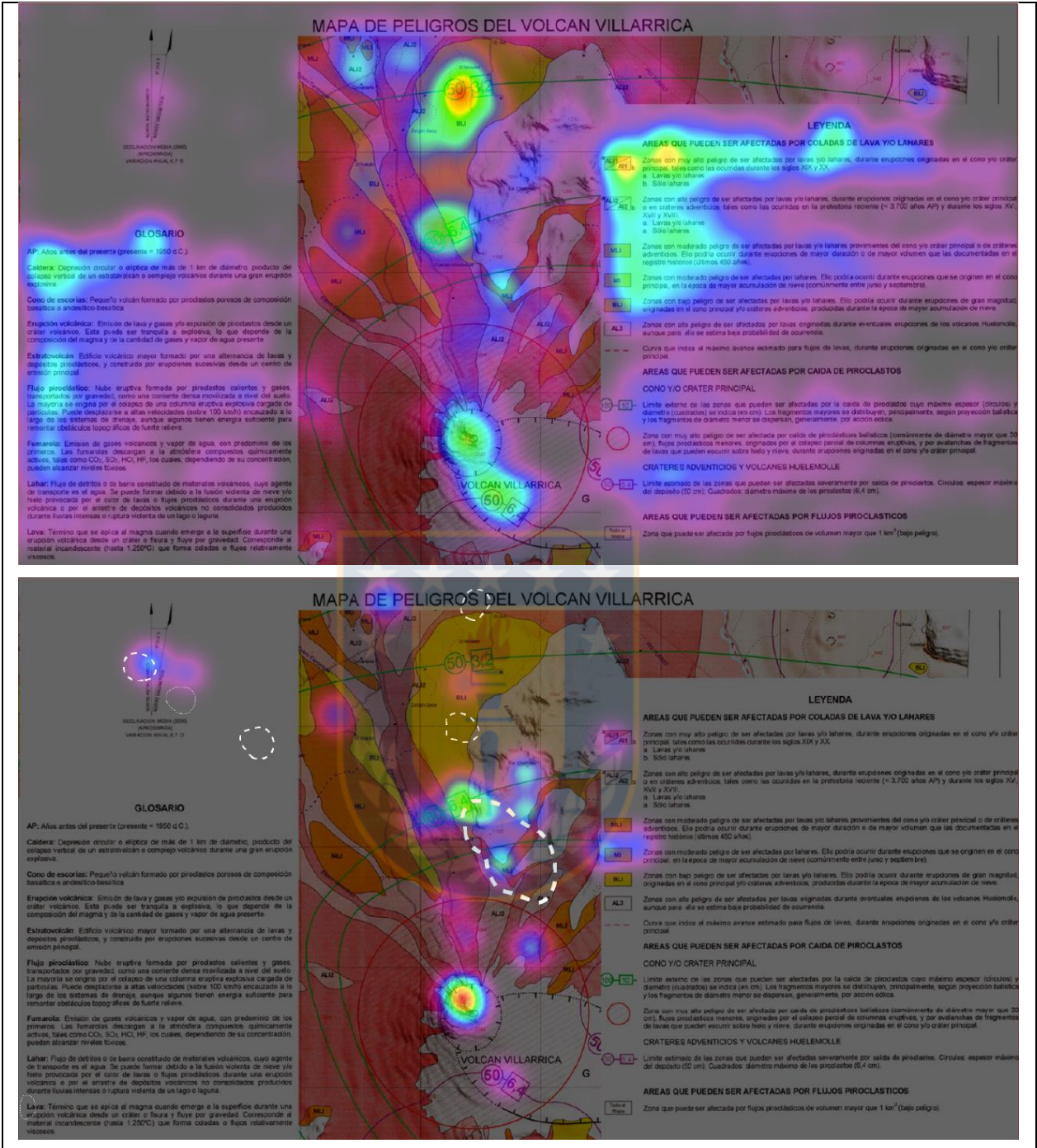


Figura 2: Mapa de atención visual general del diseño del SERNAGEOMIN. Arriba, el mapa de la cantidad total de fijaciones y, abajo, el mapa de la primera y segunda fijación. En líneas discontinuas se muestran las primeras fijaciones. Colores cálidos y líneas de mayor grosor representan mayor densidad de fijaciones.

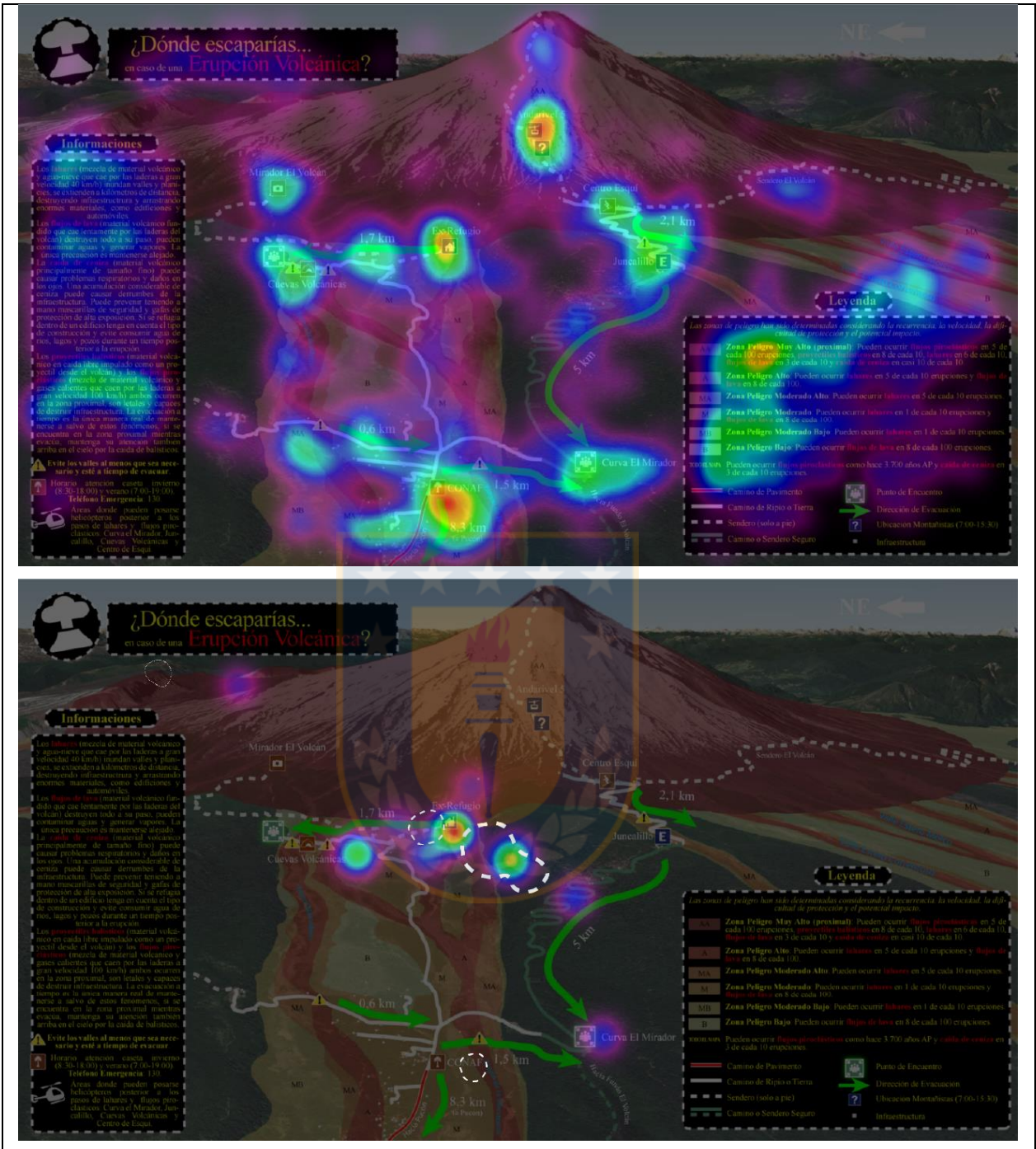


Figura 3: Mapa de atención visual de participantes con alta percepción de riesgo del diseño propio. Arriba, el mapa de la cantidad total de fijaciones y, abajo, el mapa de la primera y segunda fijación. En líneas discontinuas se muestran las primeras fijaciones. Colores cálidos y líneas de mayor grosor representan mayor densidad de fijaciones.



Figura 4: Mapa de atención visual de participantes con baja percepción de riesgo del diseño propio. Arriba, el mapa de la cantidad total de fijaciones y, abajo, el mapa de la primera y segunda fijación. En líneas discontinuas se muestran las primeras fijaciones. Colores cálidos y líneas de mayor grosor representan mayor densidad de fijaciones.

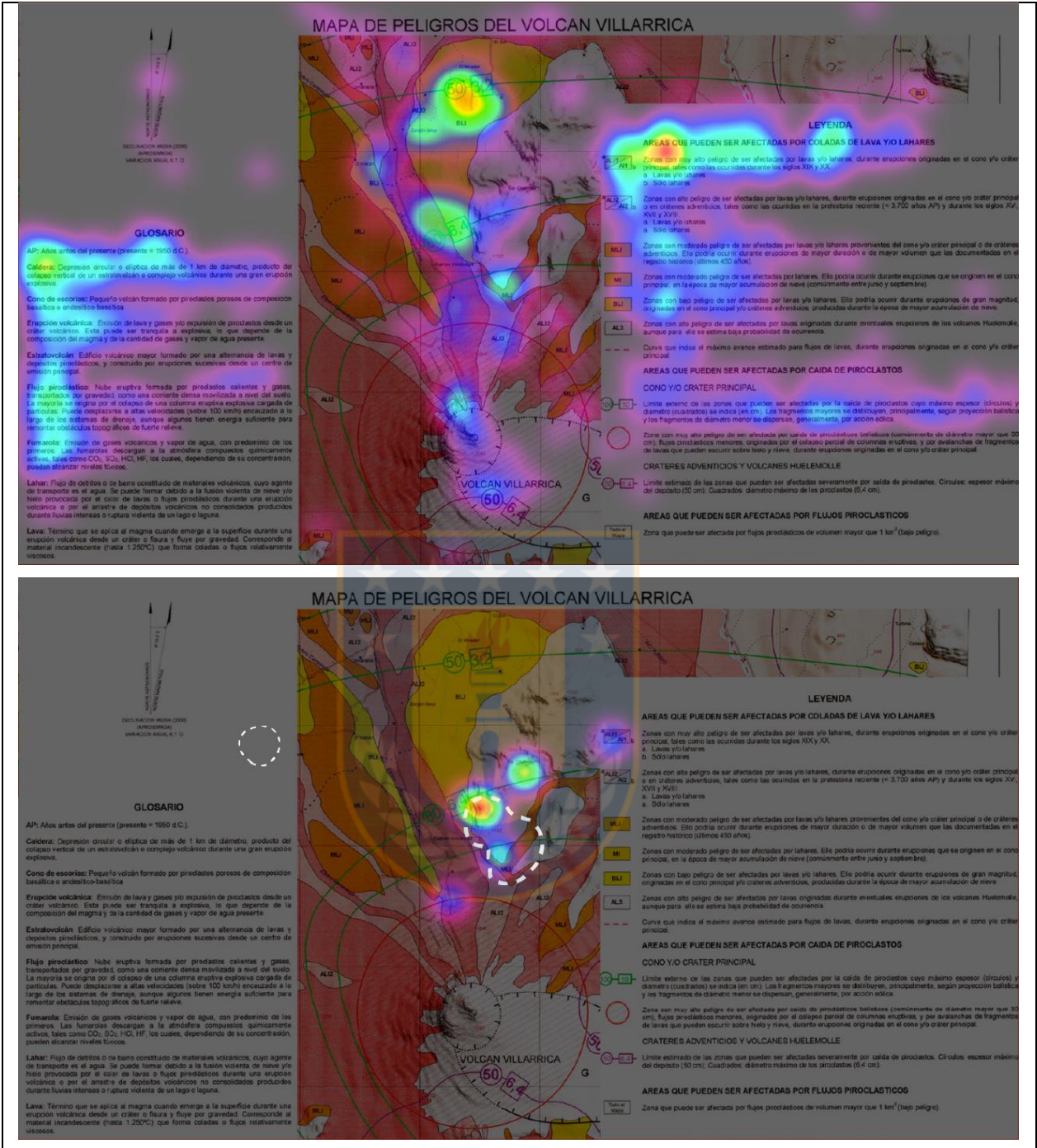


Figura 5: Mapa de atención visual de participantes con alta percepción de riesgo del diseño del **SERNAGEMIN**. Arriba, el mapa de la cantidad total de fijaciones y, abajo, el mapa de la primera y segunda fijación. En líneas discontinuas se muestran las primeras fijaciones. Colores cálidos y líneas de mayor grosor representan mayor densidad de fijaciones.

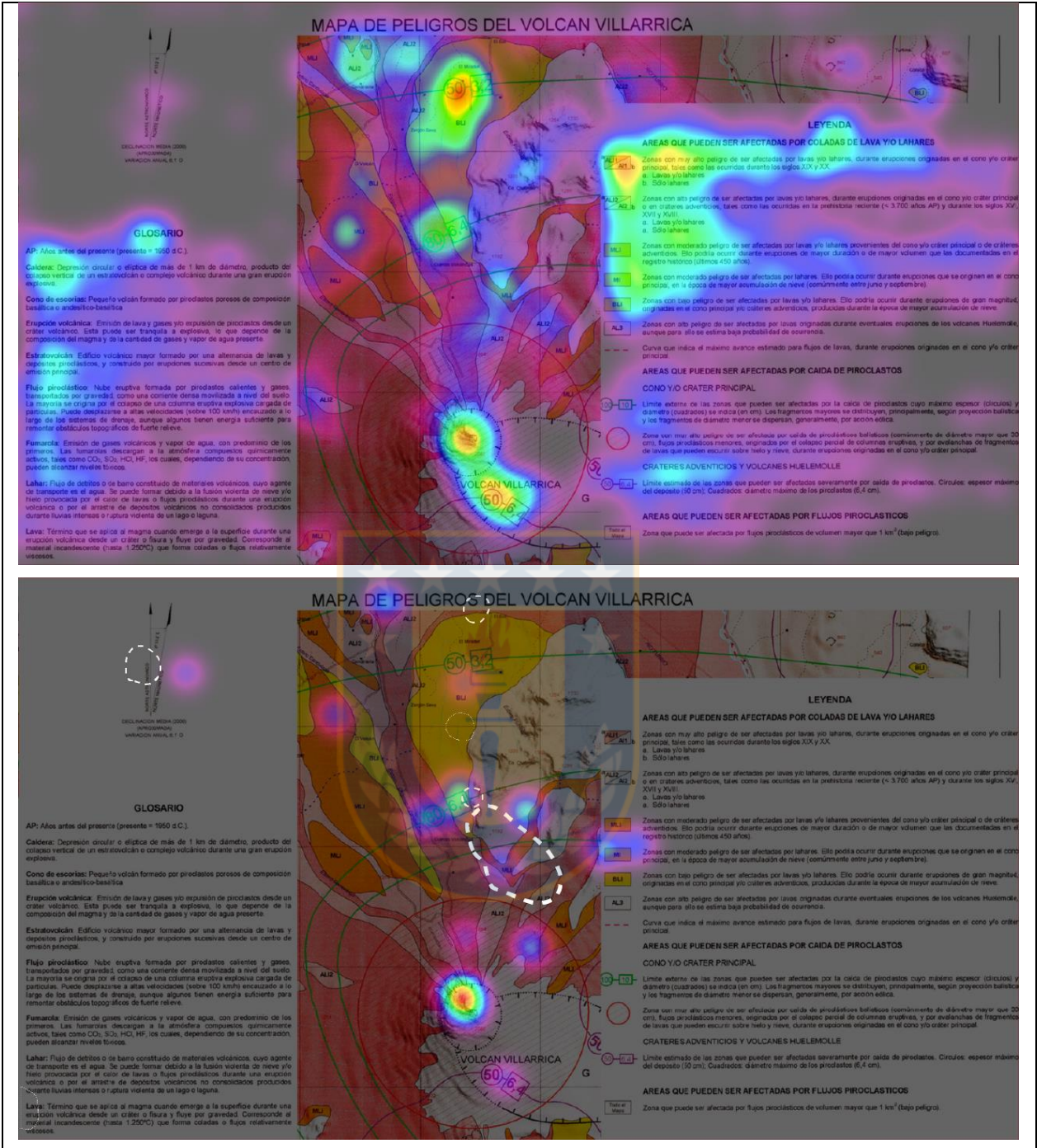


Figura 6: Mapa de atención visual de participantes con baja percepción de riesgo del diseño del SERNAGEMIN. Arriba, el mapa de la cantidad total de fijaciones y, abajo, el mapa de la primera y segunda fijación. En líneas discontinuas se muestran las primeras fijaciones. Colores cálidos y líneas de mayor grosor representan mayor densidad de fijaciones.

ANEXO VIII: OTROS MAPAS DE PELIGRO O EVACUACIÓN DEL VOLCÁN VILLARRICA

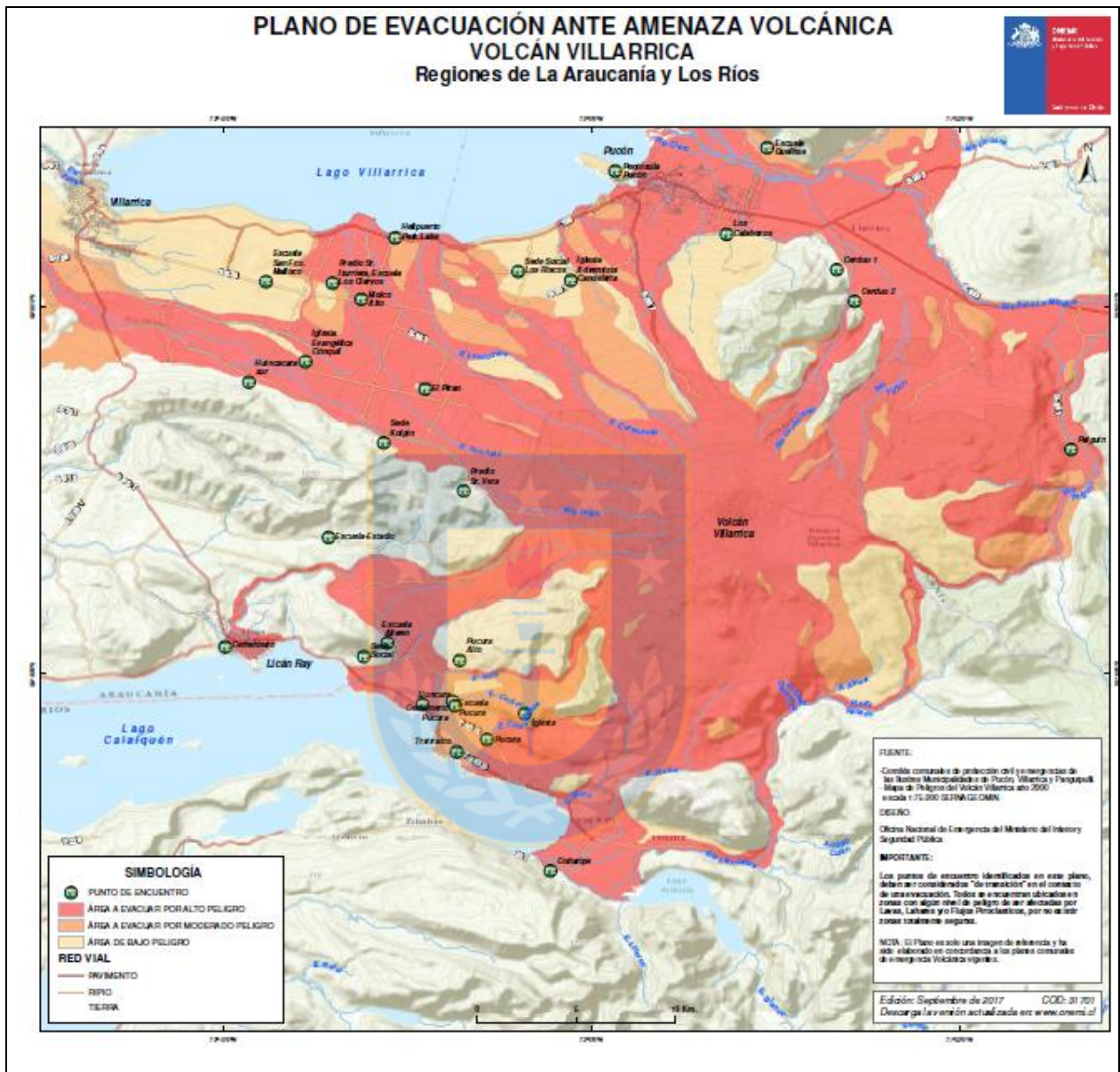


Figura 1: Extracción del plano de evacuación ante amenaza volcánica volcán Villarrica. Peligros son representados, de mayor a menor grado, en tono rojo, naranja y amarillo. Puntos de encuentro (íconos verdes). Cuerpos de agua (celeste). Rutas importantes (líneas rojas).



Figura 2: Estracción del mapa de evacuación por erupción volcánica zona de potencial peligro, comunas de Villarrica, Pucón y Panguipulli. Puntos de encuentro enumerados del 1 al 31. Se representa la zona de exclusión.