

# *INFORME ETAPA II*

# *COMPONENTE RIESGOS*

División de Planificación y Ordenamiento Territorial  
Diciembre 2012



## Contenido

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>5</b>
<b>2.</b>	<b>MARCO CONCEPTUAL.....</b>	<b>8</b>
<b>3.</b>	<b>SISTEMAS ESTRATÉGICOS.....</b>	<b>9</b>
<b>3.1</b>	<b>El Análisis de Vulnerabilidad y los Sistemas Estratégicos.....</b>	<b>9</b>
<b>3.2</b>	<b>Análisis de Exposición de Sistemas Estratégicos.....</b>	<b>10</b>
<b>3.3</b>	<b>Sistemas Estratégicos Regionales.....</b>	<b>12</b>
3.3.1	Instalaciones Esenciales	12
3.3.1.1	Seguridad y Emergencia.	13
3.3.1.2	Red de Salud Pública.	15
3.3.1.3	Red de Educación.	18
3.3.1.4	Servicios Públicos.	21
3.3.2	Instalaciones con Alto Potencial de Daños.	23
3.3.2.1	Acumulación de Aguas (Embalses; Tranques).	23
3.3.2.2	Relaves.	24
3.3.3	Redes de Transporte.	26
3.3.3.1	Vías Carreteras y Puentes.	26
3.3.3.2	Sistema Ferroviario (vías y estaciones).	29
3.3.3.3	Aeródromos.	29
3.3.3.4	Terminales de Buses.	31
3.3.3.5	Puertos (Caletas Pesqueras).	32
3.3.4.	Redes Vitales.	34
3.3.4.1.	Sistema de Abastecimiento de Agua (APR).	34
3.3.4.2	Sistema Eléctrico.	36
3.3.4.3	Sistema de Combustible (almacenamiento y transporte de petróleo).	37
3.3.4.4	Sistema de Telecomunicación (Antenas).	39
3.3.5	Asentamientos Humanos.	41
3.3.5.1	Red Asentamientos Poblados (entidades rurales; manzanas urbanas; asentamientos pesqueros).	41
<b>4.</b>	<b>PELIGRO VOLCÁNICO.....</b>	<b>44</b>
<b>4.1</b>	<b>Resumen Ejecutivo.....</b>	<b>44</b>
<b>4.2</b>	<b>Introducción.....</b>	<b>46</b>
4.2.1	Objetivo General.	46
4.2.2	Objetivo Específico.	47
<b>4.3</b>	<b>Antecedentes Generales.....</b>	<b>47</b>
4.3.1	Definiciones Previas. (modificado de Lara et al., 2011 y referencias en él).	47
4.3.1.1	Volcán, Complejo Volcánico o Grupo Volcánico.	47

4.3.1.2	Volcán Activo.	47
4.3.1.3	Peligro volcánico.	48
4.3.1.4	Vulnerabilidad.	48
4.3.1.5	Riesgo ( <i>sensu stricto</i> ).	48
4.3.1.6	Riesgo Específico.	48
4.3.1.7	Tipología de Erupciones (general).	49
4.3.1.8	Tipología de Erupciones. (Mastinet al., 2010; utilizada en Lara et al., 2011).	49
4.3.1.9	Índice de Explosividad Volcánica (IEV).	50
4.3.1.10	Peligros volcánicos a ser estudiados.	51
<b>4.4</b>	<b>Línea Base de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. ....</b>	<b>52</b>
4.4.1	Generalidades.	52
4.4.2	Geología Regional.	52
4.4.3	Volcanismo Cuaternario.	54
4.4.4	Catálogo de Volcanes.	55
4.4.4.1	Volcán Maipo.	55
4.4.4.2	Volcán Listado.	56
4.4.4.3	Volcán Andrés.	56
4.4.4.4	Volcán Palomo.	57
4.4.4.5	Volcán El Portillo.	58
4.4.4.6	Complejo Volcánico Tinguiririca.	58
4.4.4.7	Volcán Sordo Lucas.	59
4.4.4.8	Volcán Alto del Padre.	59
<b>4.5</b>	<b>Clasificación de Los Volcanes. ....</b>	<b>60</b>
<b>4.6</b>	<b>Metodología. ....</b>	<b>62</b>
<b>4.7</b>	<b>Análisis Regional del Peligro Volcánico. ....</b>	<b>66</b>
4.7.1	Peligros volcánicos.	67
4.7.2	Análisis de Sensibilidad.	72
4.7.3	Vulnerabilidad.	74
4.7.4	Probabilidad de Ocurrencia de Erupciones Futuras.	75
<b>4.8</b>	<b>Conclusiones. ....</b>	<b>76</b>
<b>4.9</b>	<b>Recomendaciones. ....</b>	<b>77</b>
<b>4.10</b>	<b>Bibliografía. ....</b>	<b>79</b>
<b>5.</b>	<b>AMENAZA SÍSMICA. ....</b>	<b>83</b>
<b>5.1</b>	<b>INTRODUCCIÓN. ....</b>	<b>83</b>
5.1.1	Objetivo.	84
<b>5.2</b>	<b>Metodología Utilizada. ....</b>	<b>84</b>
5.2.1	Mapa de Zonas de Demanda Sísmica.	84
5.2.1.1	Determinación de las Fuentes Sísmicas.	85

5.2.2	Mapa de Recurrencia Sísmica.	86
5.2.3	Combinación Ponderada de Coberturas.	90
<b>5.3</b>	<b>Resultados.....</b>	<b>92</b>
5.3.1	Actividad sísmica en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.	92
5.3.2	Riesgo Sísmico.	94
5.3.3	Riesgo Sísmico y Sistemas Estratégicos.	94
<b>5.4</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones. ....</b>	<b>98</b>
<b>5.5</b>	<b>Bibliografía .....</b>	<b>98</b>
<b>6.</b>	<b>AMENAZA DE INUNDACIÓN POR RUPTURA DE EMBALSES. ....</b>	<b>101</b>
<b>6.1</b>	<b>Introducción. ....</b>	<b>101</b>
6.1.1	Objetivo.	102
<b>6.2</b>	<b>Metodología.....</b>	<b>102</b>
6.2.1	Información Base.	102
6.2.2	Estimación de la Amenaza.	102
<b>6.3</b>	<b>Resultados.....</b>	<b>107</b>
6.3.1	Análisis de estabilidad y grado de amenaza de inundación por falla de embalses.	107
6.3.2	Identificación de Sistemas Estratégicos en Riesgo.	109
6.3.2.1	Embalse Alto Colorado.	111
6.3.2.2	Embalse Aguadilla.	111
6.3.2.3	Embalse Tierrauca.	111
6.3.2.4	Embalse Piuchén.	111
6.3.2.5	Embalse Pataguilla.	112
6.3.2.6	Embalse Picarquín.	112
6.3.2.7	Embalse Santa Lucía.	112
<b>6.4</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones. ....</b>	<b>114</b>
6.5	Anexo: Situación de Embalses Post – Terremoto.	115
<b>6.6</b>	<b>Bibliografía.....</b>	<b>147</b>
<b>7.</b>	<b>AMENAZA DE INCENDIO FORESTAL. ....</b>	<b>148</b>
<b>7.1</b>	<b>Introducción. ....</b>	<b>148</b>
7.1.1	Objetivo.	149
<b>7.2</b>	<b>Metodología.....</b>	<b>149</b>
7.2.1	Determinación de Variables.	149
7.2.1.1	Incendios Forestales Ocurridos y su Influencia.	150
7.2.1.2	Red vial y su Influencia.	150
7.2.1.4	Causas Especiales de Incendios Forestales.	152



<b>7.3</b>	<b>Resultados.....</b>	<b>155</b>
7.3.1	Distribución de las Zonas con Alto Riesgo de Incendio Forestal.	155
<b>Figura 44. Mapa de Amenaza de Incendios Forestales y Sistemas Estratégicos.(Parte 1) Fuente: Gobierno Regional, 2012. .... 159</b>		
<b>Figura 45. Mapa de Amenaza de Incendios Forestales y Sistemas Estratégicos.(Parte 2) Fuente: Gobierno Regional, 2012. .... 160</b>		
<b>7.4</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones. ....</b>	<b>161</b>
<b>7.5</b>	<b>Bibliografía. ....</b>	<b>161</b>
<b>8.</b>	<b>AMENAZA DE INUNDACIÓN POR EVENTOS METEOROLÓGICOS.....</b>	<b>162</b>
<b>8.1</b>	<b>Introducción. ....</b>	<b>162</b>
8.1.1	Objetivo.	163
<b>8.2</b>	<b>Metodología.....</b>	<b>163</b>
<b>8.3</b>	<b>Resultados.....</b>	<b>165</b>
8.3.1	Registros de inundaciones en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.	165
8.3.2	Sistemas Estratégicos en Zonas de Inundación.	167
<b>8.4</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones. ....</b>	<b>170</b>
<b>8.5</b>	<b>Bibliografía. ....</b>	<b>170</b>
<b>9.</b>	<b>AMENAZA DE TSUMANI.....</b>	<b>172</b>
<b>9.1</b>	<b>Introducción. ....</b>	<b>172</b>
9.1.1	Objetivo.	173
<b>9.2</b>	<b>Metodología.....</b>	<b>173</b>
<b>9.3</b>	<b>Resultados.....</b>	<b>178</b>
9.3.1	Riesgo de tsunami en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.	178
9.3.2	Identificación de Sistemas Estratégicos Ubicados en Áreas de Riesgo de Tsunami.	180
<b>9.4</b>	<b>Zonas de Seguridad y Resguardo. ....</b>	<b>181</b>
<b>9.5</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones. ....</b>	<b>191</b>
<b>9.6</b>	<b>Bibliografía.....</b>	<b>191</b>
<b>10.</b>	<b>CONCLUSIONES FINALES Y MAPA SÍNTESIS.....</b>	<b>193</b>

## 1. INTRODUCCIÓN.

Chile es sometido constantemente a diversas pruebas de la naturaleza, tanto de origen geológico como hidrometeorológico. En muchas ocasiones estos fenómenos de la naturaleza han afectado en forma negativa el territorio produciendo graves daños tanto a personas, como a la economía, medio ambiente e infraestructura de distintas regiones del país; a modo de ejemplo, entre los años 1981 y 2000 estos fenómenos produjeron 669 fallecimientos, 127.000 afectados y pérdidas económicas por un monto de 151 millones de dólares aproximadamente y en este último gran terremoto del 27 de febrero de 2010, las pérdidas se han estimado en MMUS\$30.000 correspondiendo aproximadamente al 16% del PIB, falleciendo 521 personas y 56 aun desaparecidas<sup>1</sup>

La Estrategia Regional de Desarrollo de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins define como una problemática, que en la región no se ha incorporado la gestión de riesgos para el ordenamiento territorial y el análisis de la inversión pública. La coordinación ante eventos catastróficos se produce sólo ante la ocurrencia de la emergencia, lo que implica una menor capacidad de respuesta de parte del Estado al no prevenir de manera integral las distintas amenazas naturales existentes en el territorio regional.

Esto implica que parte de la inversión pública sea vulnerable ante la ocurrencia de catástrofes<sup>2</sup>.

La elaboración del Plan Regional de Ordenamiento Territorial, PROT, comprende el estudio de las siguientes componentes o sistemas de análisis territorial: componente borde costero, componente riesgos, componente urbano, componente rural y componente de cuencas hidrográficas.

<sup>1</sup> Guía Análisis de Riesgos Naturales para el Ordenamiento Territorial, SUBDERE, junio 2011.

<sup>2</sup> Estrategia Regional de Desarrollo 2011-2020, Dimensión Territorial 3.3.3 Sector Gestión de Riesgos.

Por tanto, el estudio de la componente riesgos del PROT representa una oportunidad para conocer, analizar y gestionar los riesgos presentes en la región, estableciendo un punto de partida para resolver esta problemática relevada en nuestra Estrategia.

Para abordar la elaboración de esta etapa, el Gobierno Regional, conformó la Mesa Regional de Riesgos convocando para este efecto, actores públicos relacionados al tema: Oficina Regional de Emergencias, Onemi; Corporación Nacional Forestal, Conaf; Dirección de Vialidad y Dirección General de Aguas, MOP, con el fin de conocer los riesgos relevantes en la región y determinar aquellos que se debía estudiar, levantar y reunir información existente y a su vez, dejar establecidas las brechas detectadas que avalen el desarrollo de futuros estudios.

Esta Mesa de Trabajo definió los siguientes riesgos a estudiar:

- Peligro Volcánico.
- Sismos.
- Tsunamis.
- Inundaciones fluviales y por embalses.
- Incendios Forestales.

Los riesgos definidos fueron debidamente validados por la Primera Autoridad Regional, en forma previa a iniciarse esta etapa.

Asimismo, reconociendo el hecho que existe una escasa información relacionada con la situación de los volcanes en la región y, por la especificidad de esta materia tema, se solicitó asesoría técnica al Servicio Nacional de Geología y Minería. Conjuntamente, se resolvió contratar una consultoría que levantara la información básica disponible a nivel regional y nacional, que luego debía procesar, sistematizar e interpretar de cuyo resultado se pudiera apreciar la magnitud de la amenaza en la región.

La Mesa de Riesgos, a través de sus distintos integrantes, inició un levantamiento de información relacionada con el resto de los riesgos en estudio. Una vez que se contó con ese registro y se realizaron los contactos iniciales con las distintas instituciones potenciales proveedores de la información, Gobierno Regional resolvió contratar una

consultoría con el objeto de recopilar, sistematizar e interpretar la información disponible que permitiera definir la magnitud de cada amenaza a nivel regional.

Una vez conocida y clasificada la magnitud de cada una de las amenazas en estudio, se contrastó la información, con la ubicación de la población y de los distintos sistemas estratégicos de la región, lo que queda expresado en cada uno de los mapas preparados para este efecto, graficándose así el aporte que la componente riesgos entrega al Plan Regional de Ordenamiento Territorial y lo más importante, resulta ser un antecedente válido que permite adoptar decisiones con fundamento técnico al momento de emplazar la inversión pública en la región.

## **2. MARCO CONCEPTUAL.**

El marco conceptual para el análisis de la Componente o Sistema Riesgos tiene su base en la Guía de Análisis de Riesgos Naturales para el Ordenamiento Territorial, documento elaborado por la Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo en el año 2011 y desde el cual se extraen las definiciones que serán utilizadas en esta etapa.

CONCEPTO	DEFINICIÓN
AMENAZA, PELIGRO O PELIGROSIDAD.	Es la probabilidad de ocurrencia de un suceso potencialmente desastroso durante cierto periodo de tiempo en un área (lugar) dada.
VULNERABILIDAD.	Es el grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos bajo riesgo, resultado de la probable ocurrencia de un suceso desastroso, expresada en una escala desde 0 a 1 o pérdida total.
ELEMENTOS EN RIESGO O EXPOSICIÓN	Son la población, los edificios, las obras civiles, las actividades económicas, los servicios públicos, la infraestructura expuesta a un área de peligro.
RIESGO	La combinación de la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas
AMENAZA NATURAL	Es un proceso o fenómeno natural que puede ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, al igual que daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos o daños ambientales.
DESASTRE	Es una seria interrupción en el funcionamiento de una comunidad o sociedad que ocasiona gran cantidad de muertes al igual que pérdidas e impactos materiales, económicos y ambientales que excedan la capacidad de la comunidad o la sociedad afectada para hacer frente a la situación mediante el usos de sus propios recursos.

### **3. SISTEMAS ESTRATÉGICOS.**

#### **3.1 El Análisis de Vulnerabilidad y los Sistemas Estratégicos.**

Para la determinación del Riesgo se debe considerar en primer lugar, la identificación de las amenazas existentes en la región, contemplando principalmente el área (polígono) que está afectada por las diferentes amenazas, y en segundo lugar, el análisis de vulnerabilidad.

El análisis de vulnerabilidad es un proceso mediante el cual se determina el nivel de exposición y la predisposición a la pérdida de un elemento o grupo de elementos frente a una determinada amenaza o peligro estudiado. De esta manera, y para efectos del presente Plan, la vulnerabilidad se entenderá a partir de la identificación de sistemas, componentes y elementos expuestos en el área afectada por una determinada amenaza.

Para establecer que sistemas son estratégicos a nivel regional se ha considerado la singularidad funcional que cumplen estos sistemas frente a desastres naturales, esencialmente el rol estratégico que desempeñan cuando se suscita un desastre natural. En otras palabras, un sistema es estratégico porque su funcionamiento es crucial antes, durante y después de sucedido el desastre natural, porque su estructura proporciona seguridad, porque alberga alta densidad poblacional, porque en caso de sufrir alguna falla o deterioro el sistema generaría numerosas muertes o lesiones o genera grandes daños que implicaría el desvío de importantes cantidades de recursos públicos a su reposición. Otros criterios considerados para darle la categoría de estratégicos en el nivel regional a los sistemas son:

a) Permiten ubicar y servir a las nuevas actividades económicas;

- b) Apoyan a las actividades económicas existentes;
- c) Proporcionan las conexiones a las instalaciones y el apoyo de las instalaciones para la emergencia;
- d) Contribuyen con cualquier actividad de preparativo para los desastres, es decir, respuesta, recuperación y reconstrucción;
- e) Reciben una alta prioridad para su reforzamiento antes del desastre, durante las operaciones de emergencia y en su reparación rápida después de daños e interrupciones.

Para el caso de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, se definen los siguientes sistemas estratégicos:



### **3.2 Análisis de Exposición de Sistemas Estratégicos.**

La exposición refleja la posición geográfica del sistema estratégico en relación a una determinada amenaza, esta variable permite identificar el sistema o componente que puede ser afectado por una amenaza; a esta exposición se le denominará exposición física. La importancia del análisis de exposición radica en que permite discriminar rápidamente la parte del sistema o componentes que se verá afectada, lo que permite avanzar en el análisis de vulnerabilidad con respecto de la amenaza, descartando aquellos que no estén expuestos.

El análisis de exposición se entenderá como resultado y visualización del cruce de los mapas de amenazas naturales en el territorio regional con los sistemas estratégicos que han sido identificados como tales, de manera de establecer si éstos están o no expuestos a las amenazas consideradas en este estudio.

Debido a la escala de análisis (regional), solo se determinará la exposición en términos absolutos, es decir: está o no expuesto determinado sistema estratégico. Por lo mismo, no se establecerá una gradiente cualitativa ni cuantitativa.

Esto permite focalizar el análisis al revisar la exposición de cada una de las componentes que se encuentran en el área de influencia de las amenazas y mediante un proceso de discriminación se descartan aquellas que no se encuentran expuestas.



La determinación de los componentes que están expuestos son integrados en un Sistema de Información Geográfica (SIG) que contiene el mapa de influencia de cada una de las amenazas con los polígonos donde se encuentran el o los sistemas de análisis, el área de intersección de estas dos variables mostrará la exposición del



sistema y sus componentes a la amenaza natural para diversas magnitudes que la caracteriza.

### **3.3 Sistemas Estratégicos Regionales.**

#### **3.3.1 Instalaciones Esenciales.**

Corresponde a aquellos sistemas que, al verse afectados negativamente por un desastre natural, limitan la capacidad de gestión de la emergencia y restringen las opciones de respuesta efectiva durante y después del evento<sup>3</sup>.

Es importante destacar que este tipo de instalaciones sufren una fuerte presión de sus servicios una vez ocurrido un desastre, por lo que suponen un nodo crítico en la atención de la emergencia y posterior recuperación del desastre. De esta manera, es de especial atención este tipo de infraestructura, considerando que deberán estar completamente operativas para el manejo de la contingencia que sobreviene a la ocurrencia de un desastre, lo que implica reducir al mínimo el riesgo asociado a sus instalaciones.

Se consideran dentro de este tipo de instalaciones:

- Seguridad y Emergencia (Carabineros y Bomberos)
- Red de Salud Pública
- Red de Educación
- Oficinas Públicas

---

<sup>3</sup> Guía Análisis de Riesgos Naturales para el Ordenamiento Territorial, SUBDERE, junio 2011.

### 3.3.1.1 Seguridad y Emergencia.

Están constituidos por las instalaciones de Carabineros (Seguridad) y Bomberos (Emergencia). Ambas se consideran esenciales por cuanto constituyen el brazo ejecutor de los planes de emergencia para la atención y protección de la población afectada, así como de la propiedad pública y privada. Este tipo de instalaciones deben permanecer en todo momento en condiciones de prestar el servicio que se les ha encomendado, siendo su funcionamiento vital para paliar las consecuencias inherentes de un desastre natural.

El catastro con el detalle de la infraestructura existente en la región, tanto para bomberos como carabineros, fue generado a partir del listado oficial remitido a Gobierno Regional por:

- El Consejo Regional de Bomberos
- La Prefectura de Carabineros Cachapoal N° 11

De esta manera se reconocen a nivel regional un total de 82 cuarteles de bomberos y 71 reparticiones de carabineros.

PROVINCIA	N° CUARTELES BOMBEROS	N° CUARTELES CARABINEROS	TOTAL
Prov. Cachapoal	44	43	<b>87</b>
Prov. Colchagua	26	18	<b>44</b>
Prov. Cardenal Caro	12	10	<b>22</b>
<b>REGIÓN</b>	<b>82</b>	<b>71</b>	<b>153</b>

Tabla 1. Catastro cuarteles Carabineros y Bomberos, Región de O'Higgins. Fuente: Gobierno Regional 2012.

Posteriormente el listado oficial fue complementado a nivel comunal con los municipios de la región, con los que se trabajó la ubicación espacial de esta infraestructura, lo que permitió obtener la localización exacta de cada uno de ellos en el territorio regional.

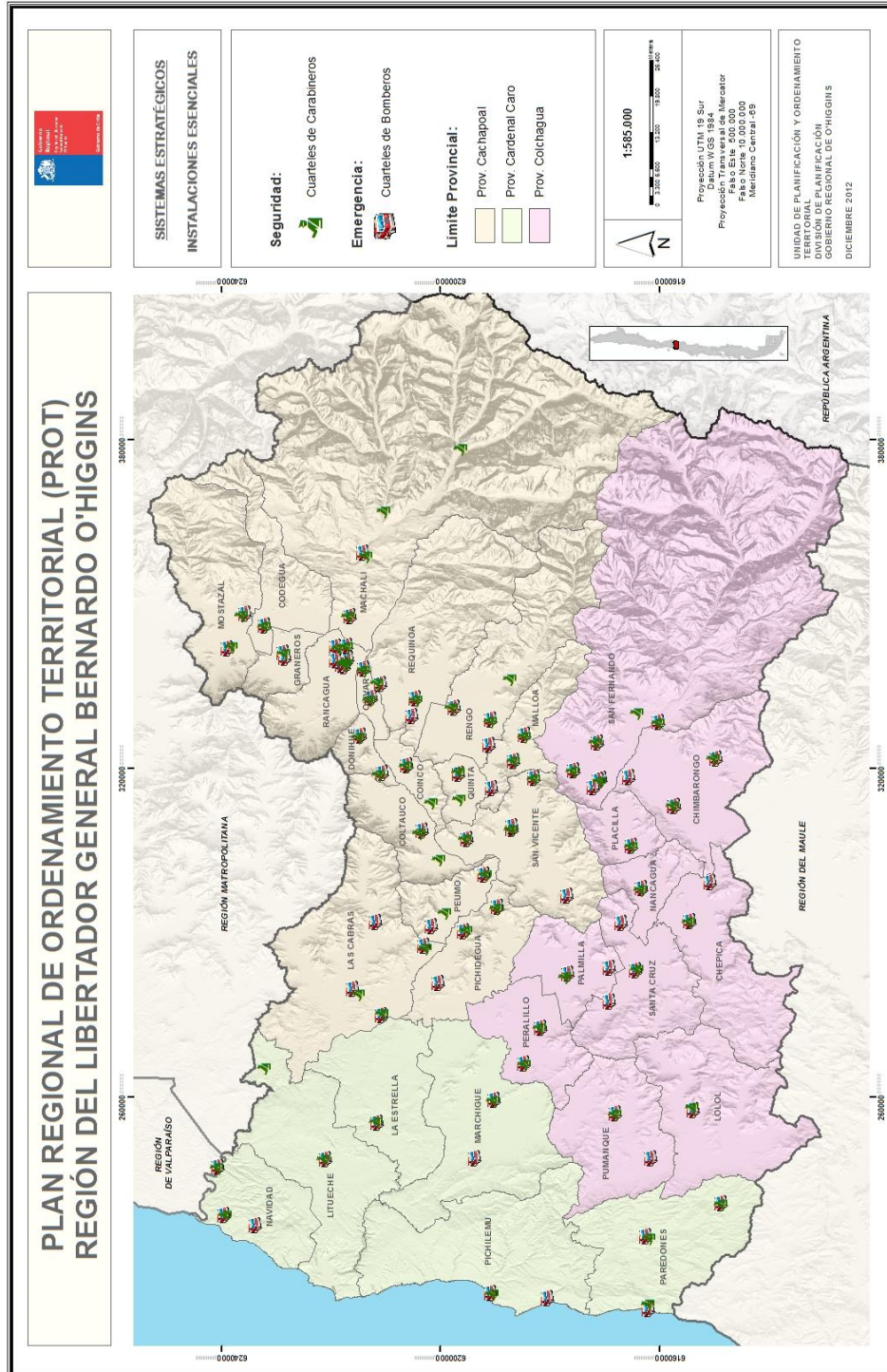


Figura 1. Instalaciones Esenciales. Seguridad y Emergencia. Fuente: Gobierno Regional.

### 3.3.1.2 Red de Salud Pública.

Las instalaciones de salud cumplen un papel crucial durante situaciones de catástrofes, en relación con la preservación de la vida y la salud de los heridos que generan las situaciones de emergencia. Se debe tener presente que ante la ocurrencia de un desastre, este tipo de infraestructura se ve sometida a un importante nivel de sobre exigencia, considerando que debe continuar con el tratamiento de pacientes alojados en sus instalaciones y atender además a las personas lesionadas por el evento.

Dado el rol estratégico de este tipo de infraestructura, los costos sociales asociados a su disfunción así como los costes económicos de su reposición o restauración son elevados, lo que obliga a extremar esfuerzos para reducir al mínimo su exposición a las amenazas.

En la Región la red de salud pública se estructura a partir de distintos tipos de establecimientos, ya sean administrados por el Servicio de Salud o por los municipios, los que se definen de acuerdo a la tecnología disponible y la especificidad del cuidado que otorgan (nivel de complejidad)<sup>4</sup>:

- Hospitales Autogestionados en Red (tipo 1 y 2), que corresponden a aquellos de mayor complejidad tecnológica y especificidad de cuidado.
- Establecimientos de Salud de menor complejidad, que se dividen en:
  - Hospitales de mediana complejidad (tipo 3)
  - Hospitales de baja complejidad (tipo 4)
  - Centros de atención primaria (CES, CESFAM, CGU, CGR, PSR)

Cada uno de estos establecimientos cumple un rol determinado dentro de la atención de pacientes, desde los niveles de menor complejidad, los que territorialmente se

---

<sup>4</sup> Marco Referencial Hospitales de la Familia y la Comunidad. Serie Cuadernos de Redes N° 20. Subsecretaría de Redes Asistenciales.

distribuyen en todo el territorio regional, hasta los centros de mayor complejidad que se concentran en las cabeceras provinciales y en la capital regional.

Para el levantamiento del catastro de las dependencias de salud del sector público se trabajó con el Servicio de Salud O'Higgins, quienes remitieron al GORE el listado oficial con la totalidad de los establecimientos que componen la red de salud pública en la región. De acuerdo a las cifras entregadas por este servicio, en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, la red pública de salud está compuesta por 127 establecimientos de distintos niveles de complejidad, según se lee en Tabla 2 siguiente:

TIPOLOGIA	PROV. CACHAPOAL	PROV. COLCHAGUA	PROV. CARDENAL CARO	REGIÓN
HOSPITAL TIPO I	1			1
HOSPITAL TIPO II		1		1
HOSPITAL TIPO III	1	1		2
HOSPITAL TIPO IV	5	3	3	11
CESFAM	18	5	2	25
CESCOF	4	1		5
CGR	2	2	1	5
PSR	32	32	13	77
<b>TOTAL REGIÓN</b>				<b>127</b>

Tabla 2. Catastro Red Asistencia de Salud Región de O´Higgins. Fuente: S. Salud O'Higgins, 2012.

Posteriormente, este catastro fue trabajado con los 33 municipios de la región, lo que permitió obtener la localización espacial georreferenciada de cada uno de los 127 establecimientos incluidos en el listado oficial, con lo cual se hace posible evaluar la exposición de este tipo de establecimientos a las amenazas naturales estudiadas.



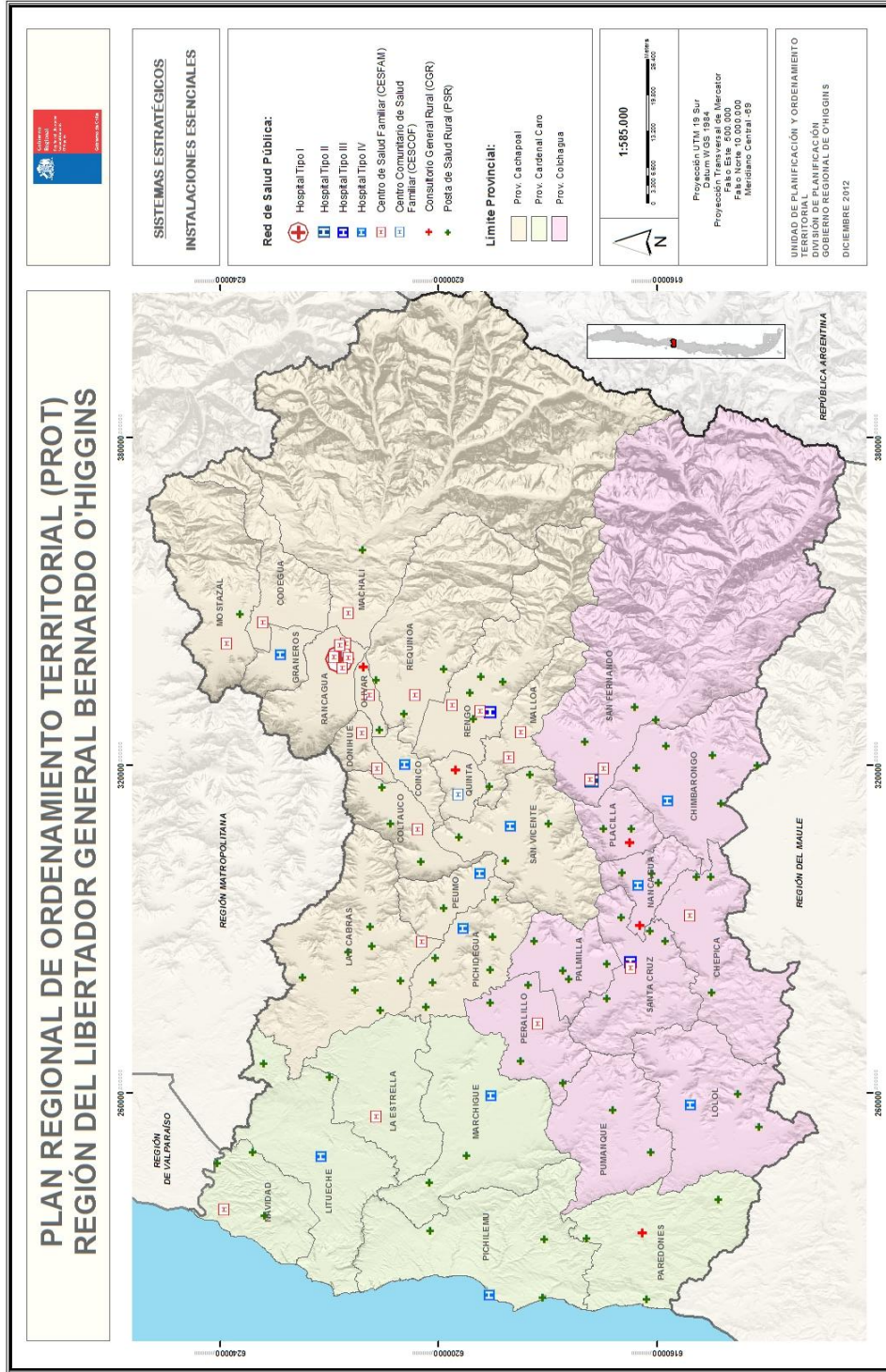


Figura 2. Instalaciones Esenciales. Red de Salud Pública. Fuente: Gobierno Regional.

### 3.3.1.3 Red de Educación.

Los centros educacionales son considerados edificaciones esenciales principalmente por el importante papel que pueden jugar en la atención de la emergencia que sobreviene a la ocurrencia de una catástrofe, ya que constituyen instalaciones con una importante distribución sobre el territorio regional, que pueden servir de alojamiento a los damnificados ante este tipo de eventos.

Asimismo, estas instalaciones se encuentran expuestas a un nivel muy importante de riesgo debido a las características de su ocupación, caracterizadas por altas concentraciones de personas en extensos períodos de tiempo. Además se debe considerar que, dada la importante y estratégica función que prestan este tipo de establecimientos, su exposición ante una determinada amenaza podría significar pérdidas importantes de recursos para su recuperación.

La red de educación en la región está conformada por los establecimiento de educación pre-escolar (jardines infantiles), escolar (básica y media) y superior (universitaria y técnico profesional). De acuerdo a la ley, la administración de los establecimientos de educación, en todos sus niveles, pueden estar en manos tanto del sector público como del privado.

Para efectos del análisis de sistemas estratégicos regionales, se considerará solo los establecimientos de educación pre-escolar de carácter público (JUNJI e INTEGRA) y los de educación básica y media, ya sean públicos o privados.

La red de educación pre escolar pública, es administrada por dos instituciones: La Junta Nacional de Jardines Infantiles (JUNJI) dependiente del Ministerio de Educación y la Fundación INTEGRA, que es una institución de derecho privado sin fines de lucro, presidida por la Primera Dama de la Nación. Entre ambas instituciones, suman un total de 182 jardines infantiles repartidos en las 33 comunas de la región.

EDUCACIÓN PRE-ESCOLAR	PRO. CACHAPOAL	PRO. COLCHAGUA	PROV. CARDENAL CARO	REGIÓN
RED JARDINES JUNJI	78	33	5	<b>116</b>
RED JARDINES INTEGRAL	35	23	8	<b>66</b>
<b>TOTAL REGIÓN</b>				<b>182</b>

Tabla 3. Catastro Red de Educación Pre-escolar Región de O´Higgins. Fuente: JUNJI e INTEGRAL, 2012.

A su vez, la red de educación básica y media, cuenta con un total de 702 establecimientos repartidos en toda la región, con un claro predominio de los de administración municipal, con cerca del 60% del total, aún cuando éstos han experimentado una baja sostenida en los últimos años. Por su parte la educación particular y particular subvencionada adquiere un rol protagónico cada vez mayor, sin embargo, estos establecimientos se circunscriben preferentemente a las áreas urbanas de las ciudades más pobladas de la región.

DEPENDENCIA ESTABLECIMIENTO	PROV. CACHAPOAL	PROV. COLCHAGUA	PROV. CARDENAL CARO	REGIÓN
MUNICIPAL	216	137	64	<b>417</b>
P. SUBVENCIONADO	192	57	4	<b>253</b>
C. PRIVADA	3	3	0	<b>6</b>
P. PAGADO	18	8	0	<b>26</b>
<b>TOTAL REGIÓN</b>				<b>702</b>

Tabla 4. Catastro Red de Educación Escolar Región de O´Higgins. Fuente: Seremi Educación, 2012.



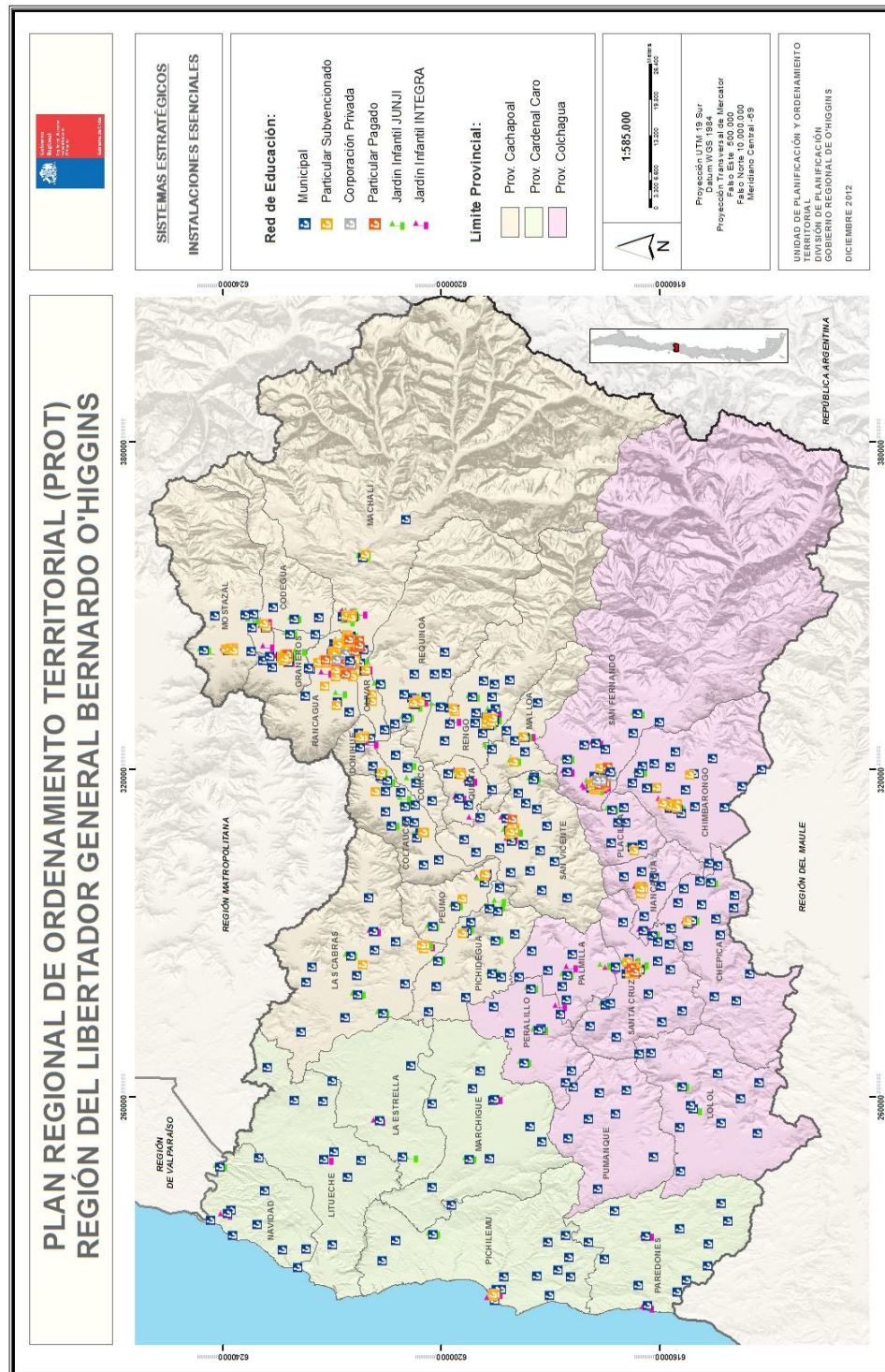


Figura 3. Instalaciones Esenciales. Red de Educación. Fuente: Gobierno Regional.

#### **3.3.1.4 Servicios Públicos.**

Representan los centros neurálgicos de planificación, coordinación y administración para la gestión de la emergencia. En ellos se gerencia la acción de los planes de emergencia y constituyen finalmente los puntos de convergencia para afrontar las consecuencias debidas a una catástrofe, de manera que su clasificación como edificaciones estratégicas obedece a los aspectos logísticos y estratégicos.

El Estado de Chile es unitario, su territorio se divide en regiones. Su administración será funcional y territorialmente descentralizada, o desconcentrada en su caso, en conformidad con la ley<sup>5</sup>.

En cuanto a las Municipalidades, estas son corporaciones autónomas de derecho público, con personalidad jurídica y patrimonio propio, cuya finalidad es satisfacer las necesidades de la comunidad local y asegurar su participación en el progreso económico, social y cultural de la comuna<sup>6</sup>. Son los organismos más descentralizados que existen en la administración del Estado, quien les entrega determinadas atribuciones en el marco de la administración del territorio comunal.

En cuanto a los Servicios Públicos en la región, estos constituyen órganos desconcentrados del Estado, encargados de ejecutar las distintas políticas emanadas del nivel central. Lo conforman:

- Intendencia
- Gobierno Regional
- Seremis
- Direcciones Regionales

---

<sup>5</sup> Constitución Política de La República de Chile

<sup>6</sup> Texto Refundido, coordinado y Sistematizado DE LA LEY Nº 18.695, Ministerio del Interior, Subsecretaría de Desarrollo Regional. Mayo 2006.

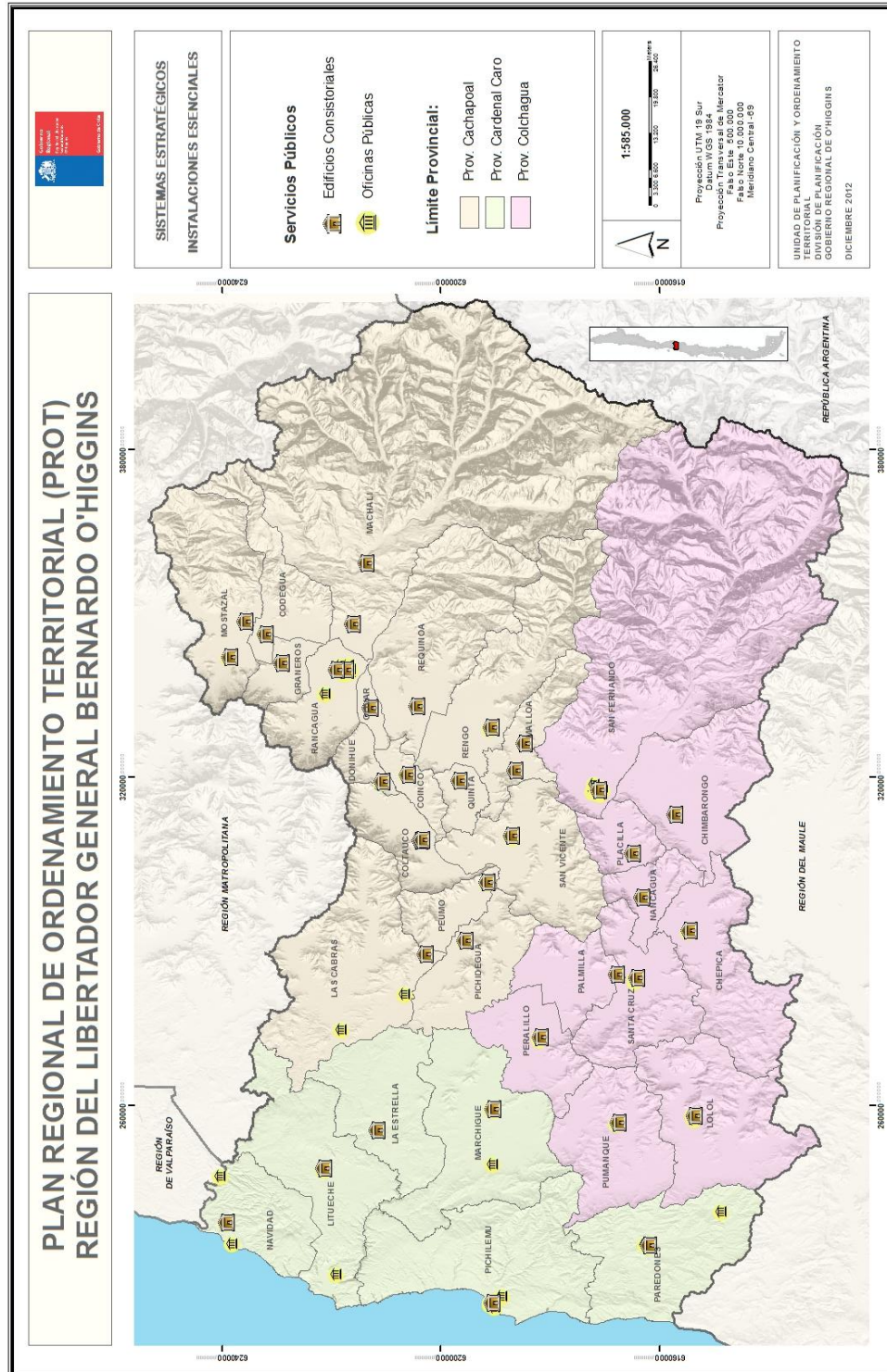


Figura 4. Instalaciones Esenciales. Servicios Públicos. Fuente: Gobierno Regional.

### 3.3.2 Instalaciones con Alto Potencial de Daños.

Corresponden a estructuras que cuando presentan algún deterioro generan nuevas situaciones de emergencia en el territorio alterando el bienestar de la población.

#### 3.3.2.1 Acumulación de Aguas (Embalses; Tranques).

Los embalses son obras hidráulicas que repasan y regulan la descarga fluvial con diferentes fines. Entre estos fines destacan la administración del recurso hídrico para su uso en la actividad agrícola e industrial, el consumo humano, la generación de energía hidroeléctrica y el control de inundaciones. Dichas obras necesitan constantes tareas de monitoreo y mantenimiento para permitir su operación de manera segura.

En su mayoría los embalses catastrados son de propiedad privada, del total de 343 embalses, entre pequeños y medianos; solo dos embalses se pueden considerar como públicos, aún cuando su administración no lo sea; es el caso del Embalse Convento Viejo, cuya administración está a cargo de una empresa concesionaria y el Embalse Los Cristales cuya administración se encuentra radicada en la Junta de Vigilancia del Río Claro.

FUENTE	Embalses (N°)	
	Menores	Mayores
Río Rapel	51	1
Río Cachapoal	227	3
Río Claro de Rengo	16	1
Estero Zamorano	11	0
Río Tinguiririca	s/i	2
Estero Las Toscas	s/i	1
Estero Chimbarongo	29	0

Tabla 5. Catastro Embalses Cuenca del Río Rapel. Fuente: Diagnóstico y clasificación usos y cursos de agua Cuenca del Río Rapel, DGA 2004.



De acuerdo a la Dirección General de Aguas del MOP, de los 343 embalses presentes en la región, 50 son considerados como relevantes y serán esos los considerados en el análisis de exposición ante las amenazas naturales.

### 3.3.2.2 Relaves.

Los relaves son desechos tóxicos subproductos de procesos mineros y concentración de minerales, usualmente una mezcla de tierra, minerales, agua y rocas. Los relaves contienen altas concentraciones de químicos y elementos que alteran el medio ambiente, por lo que deben ser transportados y almacenados en "tranques o pozas de relaves", donde lentamente los contaminantes se van decantando en el fondo y el agua es recuperada o evaporada.

En la región los relaves están asociados a la actividad de la Gran Minería desarrollada por CODELCO División El Teniente, y la mediana y pequeña minería que es desarrollada por varias empresas. Existen un total de 8 relaves, localizados principalmente en las comunas de Machalí y Requínoa, además del Embalse Caren, que si bien se ubica en la Región Metropolitana, recibe todos los desechos de la producción de El Teniente, a través de un canal de relave que pasa por más de 5 comunas de la región.

NOMBRE	COMUNA
Tranque Cauquenes	Requínoa
Tranque Margas	Machalí
Tranque Arenas	Machalí
Tranque Barahona 0	Machalí
Tranque Barahona 1	Machalí
Barahona 2	Machalí
Embalse Colihues	Requínoa
Embalse Caren	Alhue - RM

Tabla 6. Catastro Relaves Región de O´Higgins. Fuente: CODELCO DET, 2012.

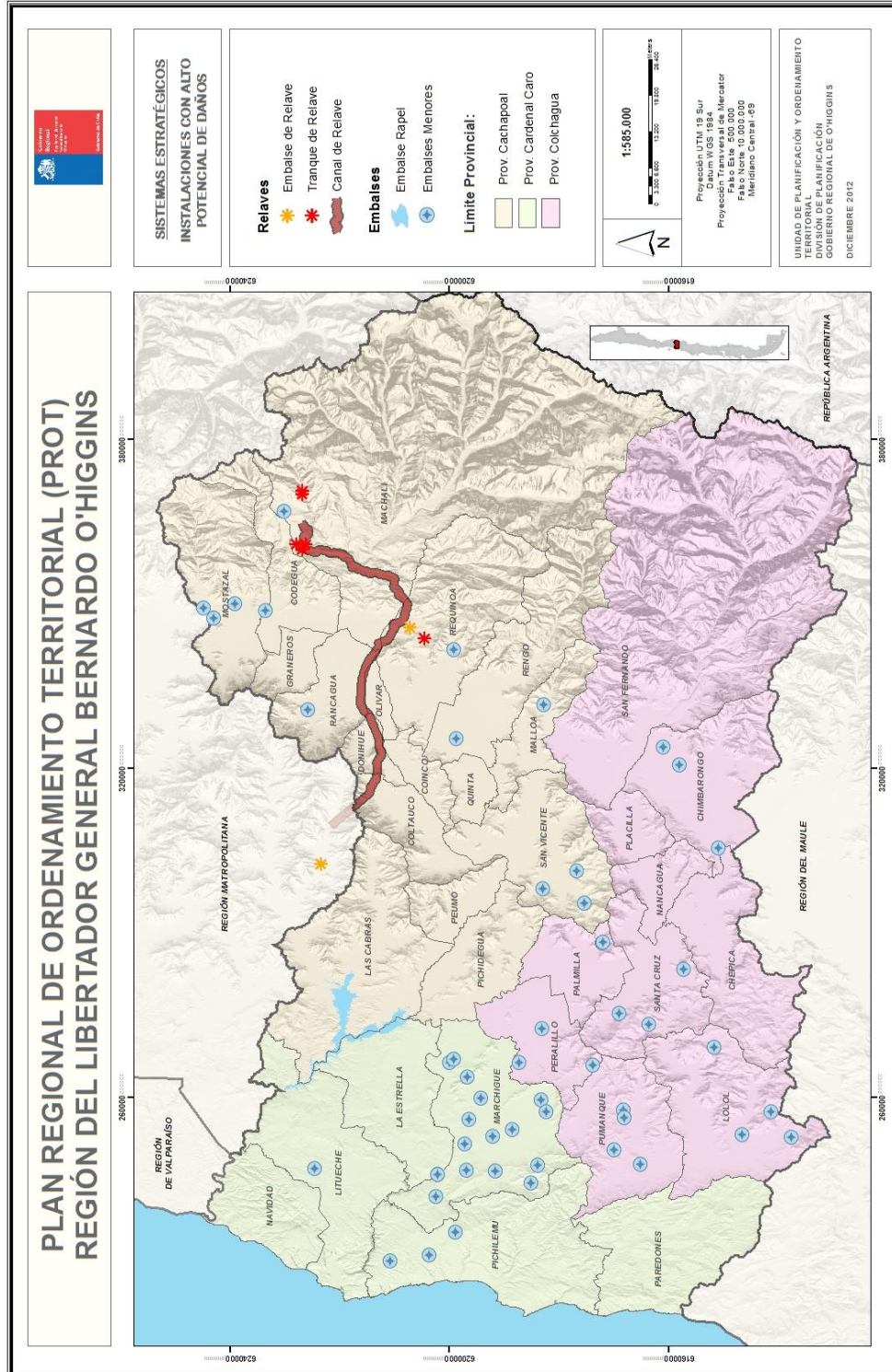


Figura 5. Instalaciones con alto potencial de daños. Relaves y Embalses. Fuente: Gobierno Regional.

### 3.3.3 Redes de Transporte.

Se entienden como sistemas que facilitan la gestión de emergencia, debido a que permiten la movilidad de las personas y la reparación de otras instalaciones críticas, en caso de inhabilitarse las redes de transporte, los territorios se ven afectados por aislamiento.

Entre este tipo de redes, las más relevantes para la región son:

#### 3.3.3.1 Vías Carreteras y Puentes.

La vialidad regional cuenta con una red que alcanza a los 3.537,43 km, que corresponden a un 4,56% de la red nacional, de la cual se identifica una red pavimentada (incluidos los caminos con capa de protección asfáltica) de 1.891,02 km y una red no pavimentada de 1.646,41 km (ripio y tierra).<sup>7</sup>

Red Vial Pavimentada (km)					Red Vial No Pavimentada (km)				Total
Asfalto	Hormigón	Asf./Horm.	Asf./Ripio	Horm./Ripio	Solución Básica		Ripio	Tierra	
					Capa Protección	Granular Estabilizado			
1.149,62	74,10	45,75	0,00	0,00	621,55	0,00	871,42	774,99	3.537,43

Tabla 7. Tipología Red Vial Región de O'Higgins. Fuente: MOP, 2012.

Adicionalmente, ha de considerarse la vialidad urbana que no es de tuición del MOP y la vialidad interurbana que se encuentra bajo administración municipal, las que en conjunto con la del MOP, constituyen la red vial regional.

<sup>7</sup> Ministerio de Obras Públicas. Plan Regional de Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico al 2021, Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

En cuanto a los puentes, éstos se consideran estratégicos dentro de la red vial regional, por cuanto representan potenciales puntos vulnerables en la estructura caminera y la clausura o restricción de uso de un puente, afectado por un desastre, supone desconectar un tramo completo para todo o parte del tránsito, alterando con ello la movilidad y la accesibilidad, y por ende dificultando enormemente la atención de la emergencia y la posterior recuperación.

De acuerdo al catastro del Ministerio de Obras Públicas, en la región existen un total de 389 puentes formando parte de la red vial, los que en conjunto suman un total de prácticamente 14 km.

PROVINCIA	RED BÁSICA		RED COMUNAL		TOTAL	
	Nº Puentes	Longitud (m)	Nº Puentes	Longitud (m)	Nº Puentes	Longitud (m)
Prov. Cachapoal	63	3604,8	97	3799,8	160	7404,6
Prov. Colchagua	56	2346,4	102	2175,8	158	4522,2
Prov. Cardenal Caro	31	1096,4	40	956,2	71	2052,6
<b>TOTAL</b>					<b>389</b>	<b>13.979,40</b>

Tabla 8. Catastro Puentes Región de O´Higgins. Fuente: MOP, 2012.



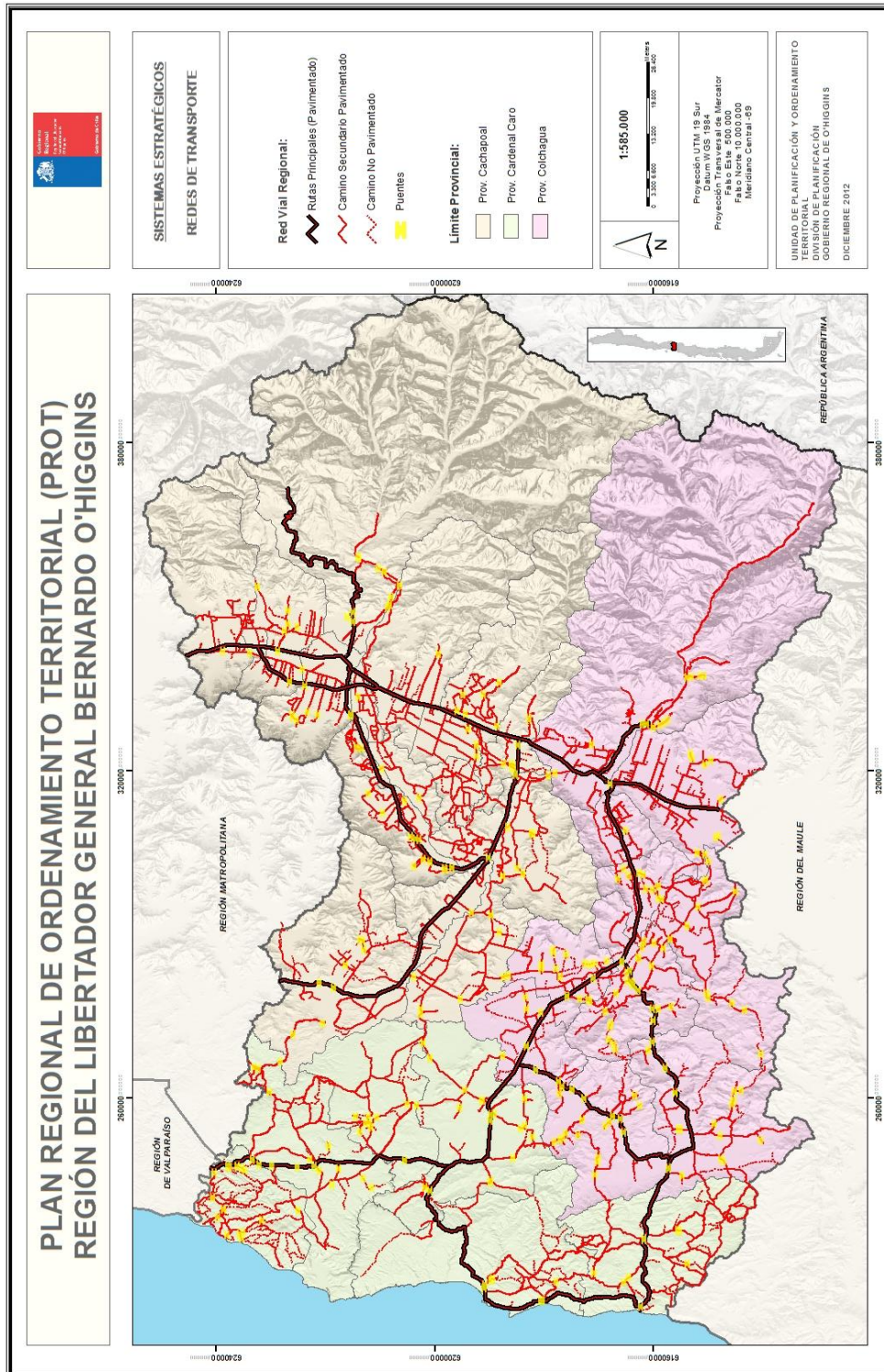


Figura 6. Redes de Transporte. Red Vial Regional. Fuente: Gobierno Regional.

### 3.3.3.2 Sistema Ferroviario (vías y estaciones).

La red ferroviaria regional está compuesta por más de 322 kilómetros de vías, las que son administradas por la Empresa de Ferrocarriles del Estado (EFE). La principal vía corre paralela a la Ruta 5, por la cual se mueven tanto trenes de pasajeros como de carga.

Esta ruta tiene un alto tráfico asociado principalmente al Metrotren, servicio que conecta Santiago con San Fernando todos los días del año, además de ser utilizado por el tren de pasajeros que realiza el tramo Santiago - Chillan.

Existe un ramal del tren que llega hasta la ciudad de Pichilemu, en la costa de la Región, sin embargo actualmente este se encuentra en desuso y es utilizado ocasionalmente por trenes con fines turísticos (tren del vino) que recorren solo algunos tramos de este ramal.

### 3.3.3.3 Aeródromos.

La red de transporte aéreo en la región está constituida exclusivamente por pequeños aeródromos, ya que no existe infraestructura asociada a una red pública principal ni secundaria (aeropuertos internacionales y nacionales), debido a la cercanía con la Región Metropolitana.

Así la red regional cuenta con un total de 26 aeródromos privados, 3 de ellos de uso exclusivamente militar, cuyo detalle se señala en Tabla 9 siguiente:

Nombre	Tipo Red	Provincia	Comuna	N° Pares de Pista	Long. (m)	Ancho (m)	Tipo superficie
Chépica	Civil	Colchagua	Chépica	1	650	18	Tierra
La Marina de Rapel	Civil	Cachapoal	Las Cabras	1	500	16	Tierra
Costa del Sol	Civil	Cardenal Caro	Litueche	1	643	30	Pasto
Litueche	Civil	Cardenal Caro	Litueche	1	635	20	Tierra
Fundo Palo Alto	Civil	Colchagua	Lolol	1	820	18	Pasto
El Carrizal	Civil	Cardenal Caro	Marchihue	1	550	18	Pasto
La Esperanza	Civil	Cardenal Caro	La Estrella	1	700	20	Ripio
La Laguna	Civil	Cardenal Caro	Marchigüe	1	600	18	Tierra
Paredes Viejas	Civil	Cardenal Caro	Marchihue	1	600	18	Tierra
Agua Santa	Civil	Colchagua	Palmilla	1	1.000	18	Maicillo
Viña Sutil	Civil	Colchagua	Peralillo	1	634	18	Maicillo compactado
Peumo	Civil	Cachapoal	Peumo	1	610	18	Tierra
Almahue	Civil	Cachapoal	Pichidegua	1	600	18	Tierra
Panilonco	Civil	Cardenal Caro	Pichilemu	1	750	18	Maicillo compactado
Pichilemu	Civil	Cardenal Caro	Pichilemu	1	640	18	Tierra
Los Paltos	Civil	Cachapoal	Quinta	1	500	15	Tierra
De La Independencia	Militar	Cachapoal	Rancagua	1	1.650	23	Asfalto
La Estrella	Civil	Cardenal Caro	Navidad	1	600	45	Pasto
Las Águilas	Militar	Cardenal Caro	Navidad	1	800	30	Ripio
Las Águilas Oriente	Militar	Cardenal Caro	Navidad	1	800	15	Maicillo compacto
Rapelhuapi	Civil	Cardenal Caro	Navidad	1	1.000	20	Ripio
Fundo Naicura	Civil	Cachapoal	Rengo	1	510	18	Tierra, pasto
Los Gómeros	Civil	Cachapoal	Rengo	1	565	15	Tierra
San Fernando	Civil	Colchagua	San Fernando	1	950	18	Tierra
Aerosantacruz/Aerosanta Cruz	Civil	Colchagua	Santa Cruz	1	655	17	Maicillo
El Boldal	Civil	Colchagua	Santa Cruz	1	780	18	Tierra

Tabla 9. Catastro Aeródromos Región de O'Higgins. Fuente: MOP, Dirección Nacional de Aeródromos, 2012.

### 3.3.3.4 Terminales de Buses.

Los terminales de buses son lugares diseñados para que buses urbanos o interurbanos se estacionan temporalmente para recoger y dejar pasajeros. A pesar que los terminales pueden ser públicos o privados, se consideran edificios de uso público, por lo tanto, las edificaciones construidas al interior de terminales deben satisfacer las condiciones relativas a edificios de uso público. La localización de los terminales de buses a menudo obedece a consideraciones relativas a los usos del suelo permitidos, la relación con las vías de acceso, y la relación con el origen y/o destino del servicio. Respecto a los usos del suelo donde está permitido el emplazamiento de terminales, la normativa autoriza su localización sólo donde expresamente los instrumentos de planificación territorial admitan dicho uso, en cuya definición se considera la capacidad vial y productivas del entorno.

NOMBRE	COMUNA	PROVINCIA
Terminal de Buses O'Higgins	Rancagua	Cachapoal
Terminal Tur Bus	Rancagua	
Terminal Rodoviario	Rancagua	
Terminal de Buses	San Vicente	
Terminal de Buses	Rengo	
Terminal de Buses	Peumo	
Terminal de Buses	Las Cabras	Colchagua
Terminal de Buses	San Fernando	
Terminal de Buses	San Fernando	
Terminal de Buses	Santa Cruz	
Terminal de Buses	Chimbarongo	Cardenal Caro
Terminal de Buses	Pichilemu	

Tabla 10. Catastro Terminales Buses Región de O'Higgins. Fuente: Gobierno Regional, 2012.

### 3.3.3.5 Puertos (Caletas Pesqueras).

La condición de tener un gran territorio marítimo, con más de 100 km de longitud de costa, no ha sido suficiente para que se instale alguna obra de envergadura en sus costas. La no existencia en forma natural de bahías abrigadas, la batimetría del suelo marino, la morfología de la costa, que encarece el desarrollo de obras portuarias, y la existencia de importantes terminales portuarios en la región de Valparaíso que poseen buena conectividad y que logran satisfacer la demanda de transporte de carga de la zona central, han hecho que a la fecha se haya descartado la construcción de un puerto en la región, ya sea por parte del Estado como por parte del sector privado. En el ámbito pesquero tampoco existe una flota regional importante, ni plantas de procesos de productos del mar, por lo que no ha sido requerida la construcción de grandes obras de infraestructura portuaria pesquera artesanal ni industrial.

De esta manera la función de las caletas pesqueras asociadas a la conectividad es bastante menor, sin embargo juegan un importante rol en la economía costera de subsistencia, al tiempo que constituyen una expresión de la cultura y de las formas de organización social de la población que en ellas habitan. Lo anterior las transforma en sitios de atracción turística privilegiada en la medida en que la pesca se ejerce a través de mecanismos en su mayoría en desuso en los países en vías de industrialización e innovación tecnológica, como es el caso de Chile.

En la región solo existen 5 Caletas oficializadas por los Decretos Supremos de Marina Nº 240 y 337, que de norte a sur son:

- Boca de Rapel
- Matanza
- Puertecillo
- Pichilemu
- Bucalemu.



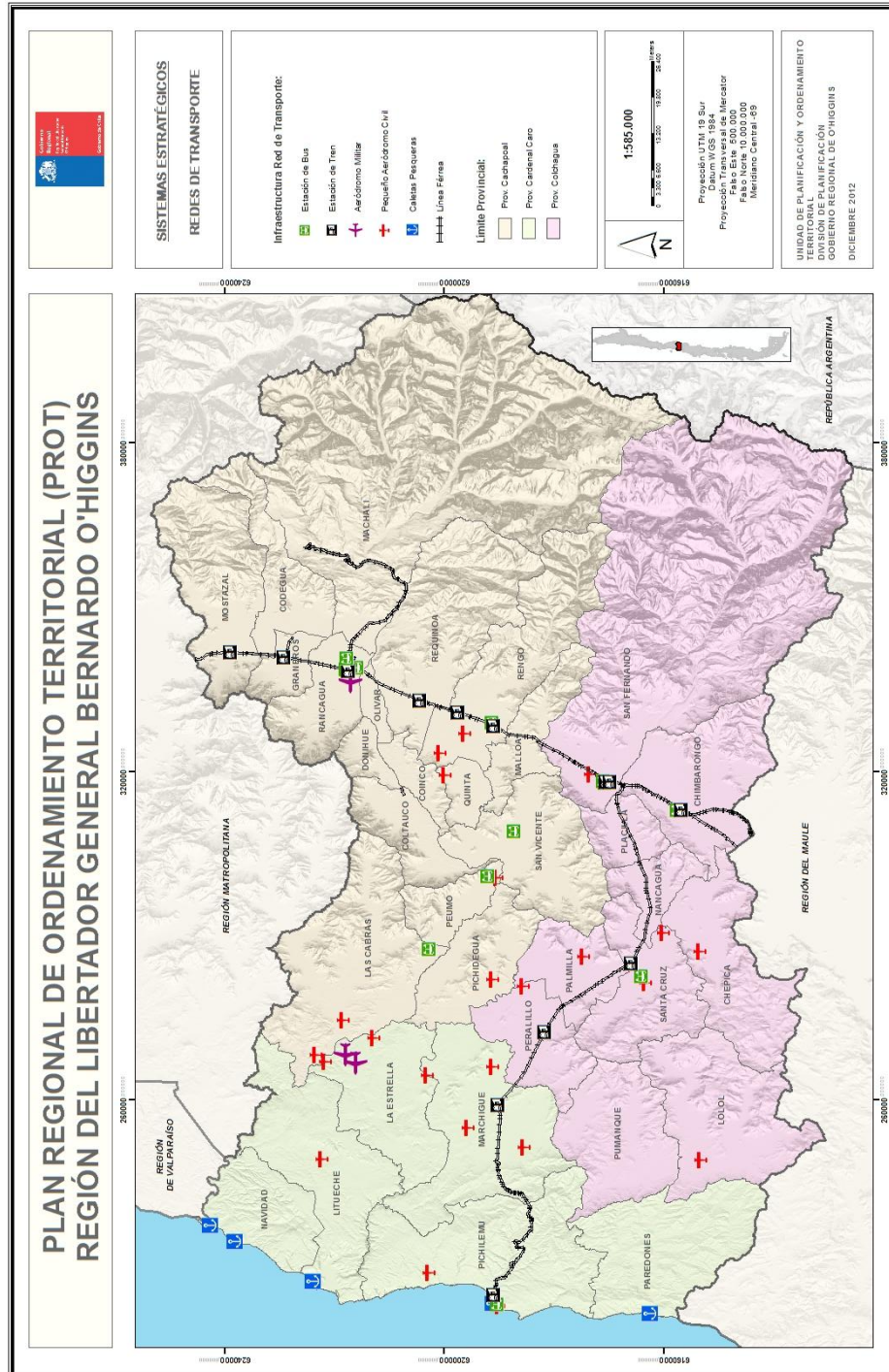


Figura 7. Redes de Transporte. Infraestructura Red de Transporte. Fuente: Gobierno Regional.

### 3.3.4. Redes Vitales.

Son aquellos sistemas que están distribuidos espacialmente en el territorio y que por su extensión están altamente expuestos a eventos naturales. Estos sistemas proporcionan servicios de primera necesidad, por lo que de ser inhabilitados alguno de ellos por la ocurrencia de algún desastre, la población presentaría situaciones de emergencia.

Entre los más importantes en la región están:

#### 3.3.4.1. Sistema de Abastecimiento de Agua (APR).

La totalidad de la red de agua potable y alcantarillado urbano es atendida en la región por la empresa privada, mientras que en el área rural y fuera de las áreas operacionales de la empresa sanitaria presenta inversión del Estado a través del Ministerio de Obras Públicas.

En el medio rural, para poblaciones concentradas pequeñas, el abastecimiento de agua se realiza mediante el sistema de Agua Potable Rural (APR), los que son administrados por diversos comités organizados para cumplir ese fin, así como también otros modelos de organización como las cooperativas.

Se destaca que el sector rural concentrado tiene una cobertura del 100% en agua potable intradomiciliaria y que se encuentra en desarrollo el programa de inversión para abastecer de agua potable al sector rural semiconcentrado. En resumen, se identifican 216 servicios existentes de APR en la región, cuya desagregación provincial se lee en cuadro siguiente:

Provincia de Cachapoal	<b>108</b>
Provincia de Colchagua	<b>81</b>
Provincia de Cardenal Caro	<b>27</b>

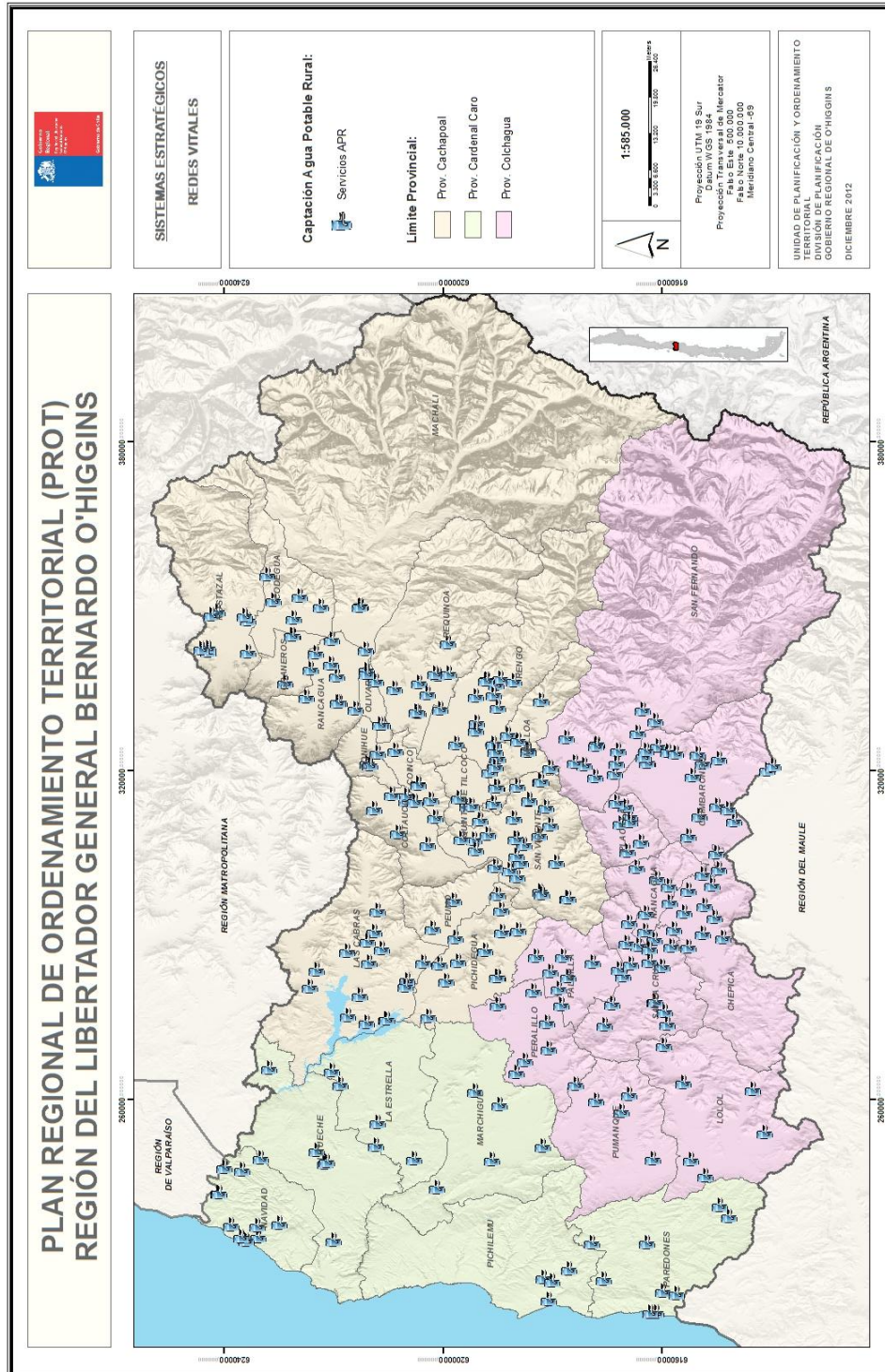


Figura 8. Redes Vitales. Captación de Agua Potable Rural. Fuente: Gobierno Regional.



### 3.3.4.2 Sistema Eléctrico.

La matriz de generación eléctrica regional está compuesta exclusivamente por unidades generadoras térmicas e hidráulicas. En los últimos años se ha visto un incremento sustancial en la instalación de centrales de pasadas, principalmente en los ríos Tinguiririca y Cachapoal. De acuerdo al catastro del Ministerio de Energía, en la región existe un total de 20 centrales:

NOMBRE CENTRAL	COMUNA	TIPO DE COMBUSTIBLE
Chacayes	Machalí	Hidráulica Pasada
La Higuera	San Fernando	Hidráulica Pasada
Sauzal	Rancagua	Hidráulica Pasada
Sauzalito	Rancagua	Hidráulica Pasada
Rapel	Las Cabras	Hidráulica Embalse
Coya	Machalí	Hidráulica Pasada
La Confluencia	San Fernando	Hidráulica Pasada
Convento Viejo	Chimbarongo	Hidráulica Pasada
El Paso	San Fernando	Hidráulica Pasada
San Andrés	San Fernando	Hidráulica Pasada
Pangal	Machalí	Hidráulica Pasada
Esperanza 2	Requinoa	Petróleo Diesel
San Francisco de Mostazal 2	Mostazal	Petróleo Diesel
Sistema de Respaldo Faenadora Lo Miranda	Doñihue	Petróleo Diesel
Sistema de Respaldo Faenadora Rosario	Rengo	Petróleo Diesel
San Francisco de Mostazal	Mostazal	Petróleo Diesel
Esperanza	Rancagua	Petróleo Diesel
Colihues	Rancagua	Petróleo Diesel
Candelaria	Codegua	Gas Natural
Masisa	Rancagua	Biomasa

Tabla 11. Catastro Centrales de Generación Eléctrica Regionales. Fuente: Ministerio de Energía, 2012.

En conjunto estas centrales aglutinan una capacidad máxima instalada del 8,2% del Sistema Interconectado Central (SIC), generando en promedio el 4,2% de la energía que circuló en el SIC el año 2008<sup>8</sup>.

Los sistemas de distribución están constituidos por las líneas, subestaciones y equipos que permiten prestar el servicio de destinar la electricidad hasta los consumidores finales, localizados en cierta zona geográfica explícitamente limitada. Las empresas de distribución operan bajo un régimen de concesión de servicio público, con obligación de servicio y con tarifas reguladas para el suministro a clientes regulados.

#### **3.3.4.3 Sistema de Combustible (almacenamiento y transporte de petróleo).**

En la región existe una importante planta de almacenamiento y distribución de combustible, de propiedad de la Empresa Enap. A este centro de almacenamiento llega combustible proveniente de la Refinería Bío Bío en Hualpén (Región del Bío Bío), a través de un oleoducto propiedad de Enap Refinerías S.A. Desde este punto, el oleoducto de Enap Refinerías S.A. se conecta con otro de la empresa Sonacol, que se extiende hasta Maipú (135 km), en la Región Metropolitana.

Esta planta sirve de acopio de combustibles derivados del petróleo, como el GLP, Gasolina, Kerosene y Petróleo Diesel, provenientes de las refinerías de la Región del Bío-Bío, desde donde son distribuidas a clientes mayoristas, a través del oleoducto que va a la Región Metropolitana, interconexión con estanques de terceros y/o con plantas de envasado de gas licuado e islas de carga de camiones.

La Planta San Fernando entrega combustibles a siete empresas: Copec, Enex, Abastible, Lipigas, Gasco, Coagra y Santa María.

---

<sup>8</sup> Estadística INE, Generación de Energía Eléctrica por Región, nov. 2009.

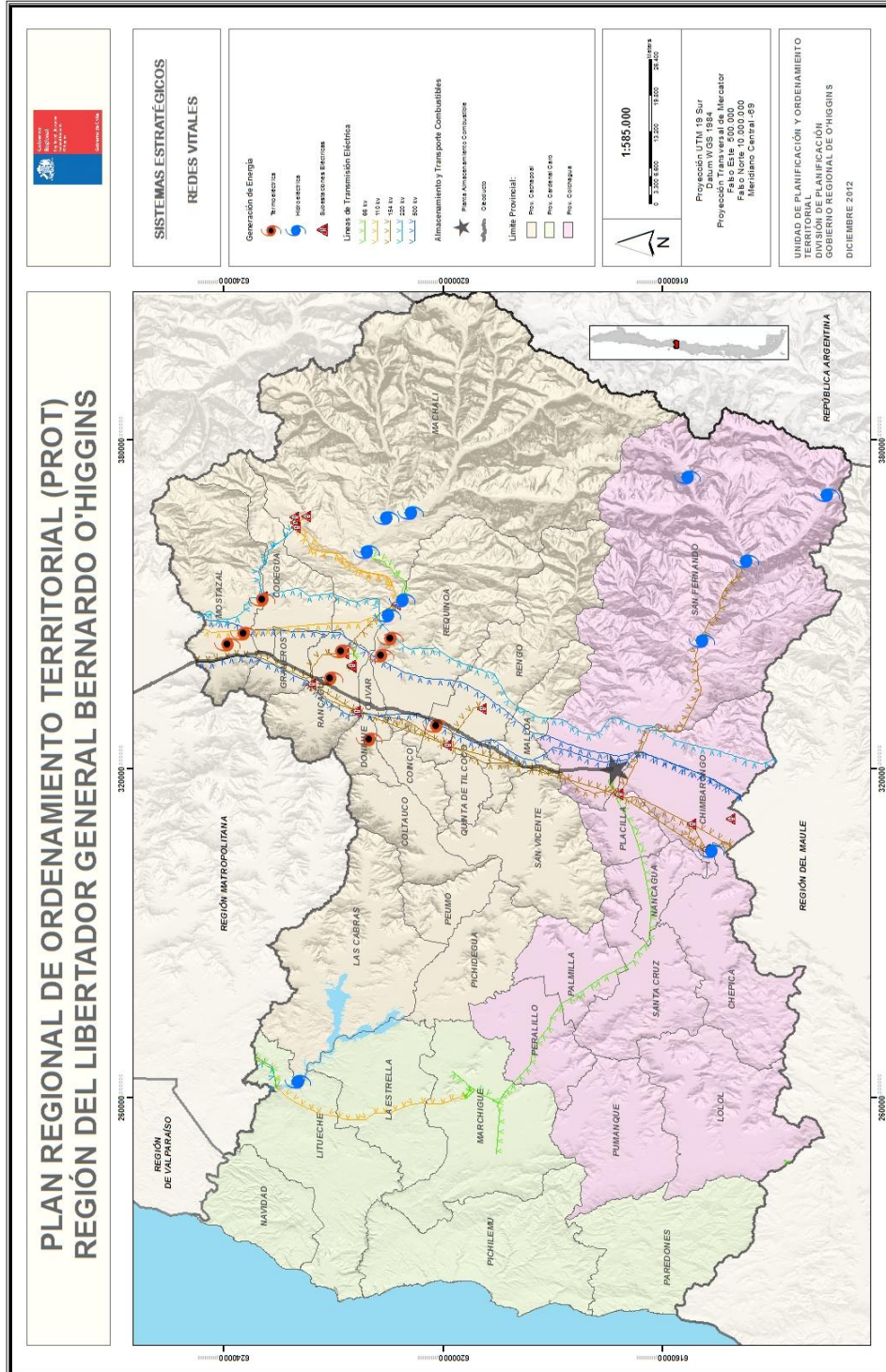


Figura 9. Redes Vitales. Generación de Energía, Distribución, Almacenamiento y Transporte. Fuente Gobierno Regional.

#### **3.3.4.4 Sistema de Telecomunicación (Antenas).**

El Sistema de Telecomunicaciones obedece a las redes que soportan la prestación de los servicios de comunicación a los usuarios finales, las que son de dos tipos. En primer lugar, las redes de servicio (telefonía fija, telefonía móvil, datos, e internet) que están constituidas por un conjunto de elementos de red llamados generalmente nodos o switches, y en segundo lugar las redes de acceso que conectan a los usuarios finales con dichas redes de servicio. Estas redes de acceso pueden ser de distintas tecnologías, ya sea alámbricas o inalámbricas.

La telefonía fija es un tipo de servicios en que se distinguen dos tipos de arquitectura que coexisten en mayor o menor medida, dependiendo del operador específico. En el primer tipo, predomina la formada por nodos o centrales telefónicas convencionales las que se interconectan a través de redes de transporte mayoritariamente de fibra óptica. La segunda arquitectura corresponde a la formada por centrales de tecnología IP83 pertenecientes a las redes de nueva generación y que se conocen bajo el nombre de softswitch. Estos últimos se conectan directamente usando protocolos de red y transporte TCP/IP84 a través de las redes de datos IP/MPLS85 que finalmente usan la misma red de transporte de fibra óptica.

La telefonía móvil es una arquitectura de redes móviles que se dividen en dos, por un lado están las redes móviles de segunda generación (2G) y por el otro lado están las redes móviles de tercera generación (3G), actualmente ambas están siendo utilizadas por los principales operadores de telefonía móvil en Chile y las dos dependen de antenas para la propagación de su señal.



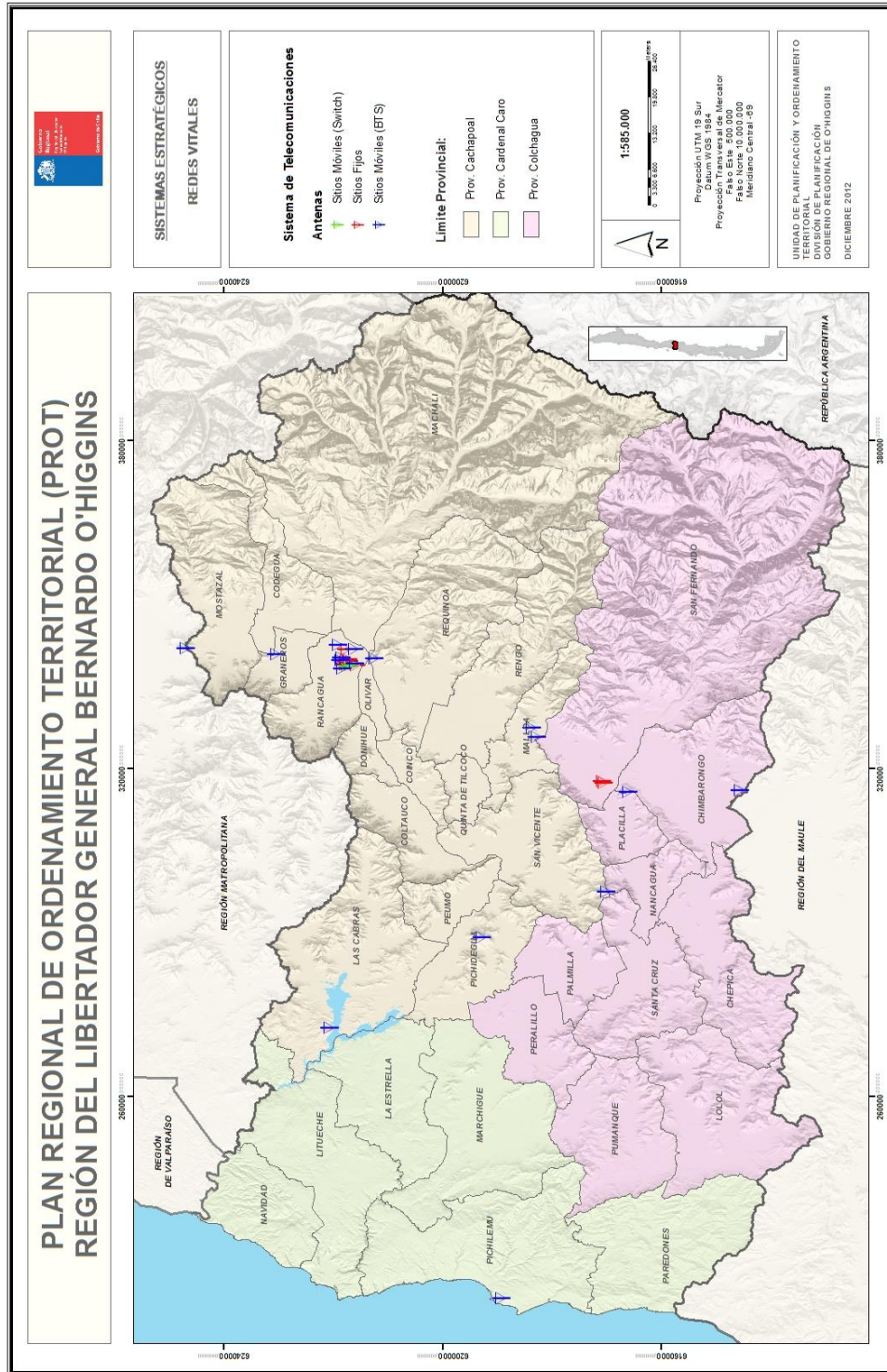


Figura 10. Redes Vitales. Sistema de Telecomunicaciones. Fuente: Gobierno Regional.

### 3.3.5 Asentamientos Humanos.

Áreas pobladas que concentran una importante cantidad de población, recursos y actividades, con una muy importante distribución en el territorio regional, lo que las transforma en zonas propensas a los desastres naturales.

Los desastres naturales se definen por los efectos que causan en las sociedades humanas. Cuando existe una acumulación de personas es lógico que los desastres naturales tengan efectos mayores<sup>9</sup>.

#### 3.3.5.1 Red Asentamientos Poblados (entidades rurales; manzanas urbanas; asentamientos pesqueros).

Los asentamientos humanos considerados corresponden a aquellos levantados a partir del Censo de Población y Vivienda del año 2002 del Instituto Nacional de Estadísticas (INE), los cuales fueron espacializados por el Gobierno Regional de O'Higgins.

El INE distingue los siguientes tipos de asentamientos humanos para Chile:

- Localidades pobladas urbanas
  - Son todas aquellas que tienen más de 2.000 habitantes, o aquellas que tienen más de 1.000 habitantes y cuya población, en al menos un 50%, trabaja en actividades secundarias o terciarias. Dentro de estas se distinguen las siguientes tipologías:
    - Ciudades: Asentamientos humanos con más de 5.000 habitantes.
    - Pueblos: entre 2.001 y 5.000 habitantes. También entre 1.001 y 2.000 habitantes, siempre que al menos la mitad de su población trabaje en actividades secundarias o terciarias.

---

<sup>9</sup> Reducción de los Desastres en Zonas Urbanas. Secretaria del Decenio Internacional para la Reducción de los Desastres Naturales, Ginebra. 1995

- Centros turísticos: Localidades pobladas con más de 250 viviendas, que tengan como actividad el turismo.
  
- Localidades rurales  
Son todas aquellas que tienen menos de 1.000 habitantes, o aquellas que tienen entre de 1.001 y 2.000 habitantes, cuya población trabaja en un 50% o más actividades primarias. Dentro de estas se distinguen las siguientes tipologías:
  - Aldeas: localidades con una población entre los 301 y los 1.000 habitantes.
  - Caseríos, Fundos, Estancias, Haciendas y otras localidades: Presentan una población inferior a los 300 habitantes.

Adicionalmente, se reconocen en la Región Asentamientos Pesqueros, que representan pequeñas entidades pobladas, de carácter temporal o permanente, ubicadas a lo largo del borde costero regional y que están asociados a la actividad pesquero artesanal que se desarrolla en vastos sectores de la costa de nuestra región.

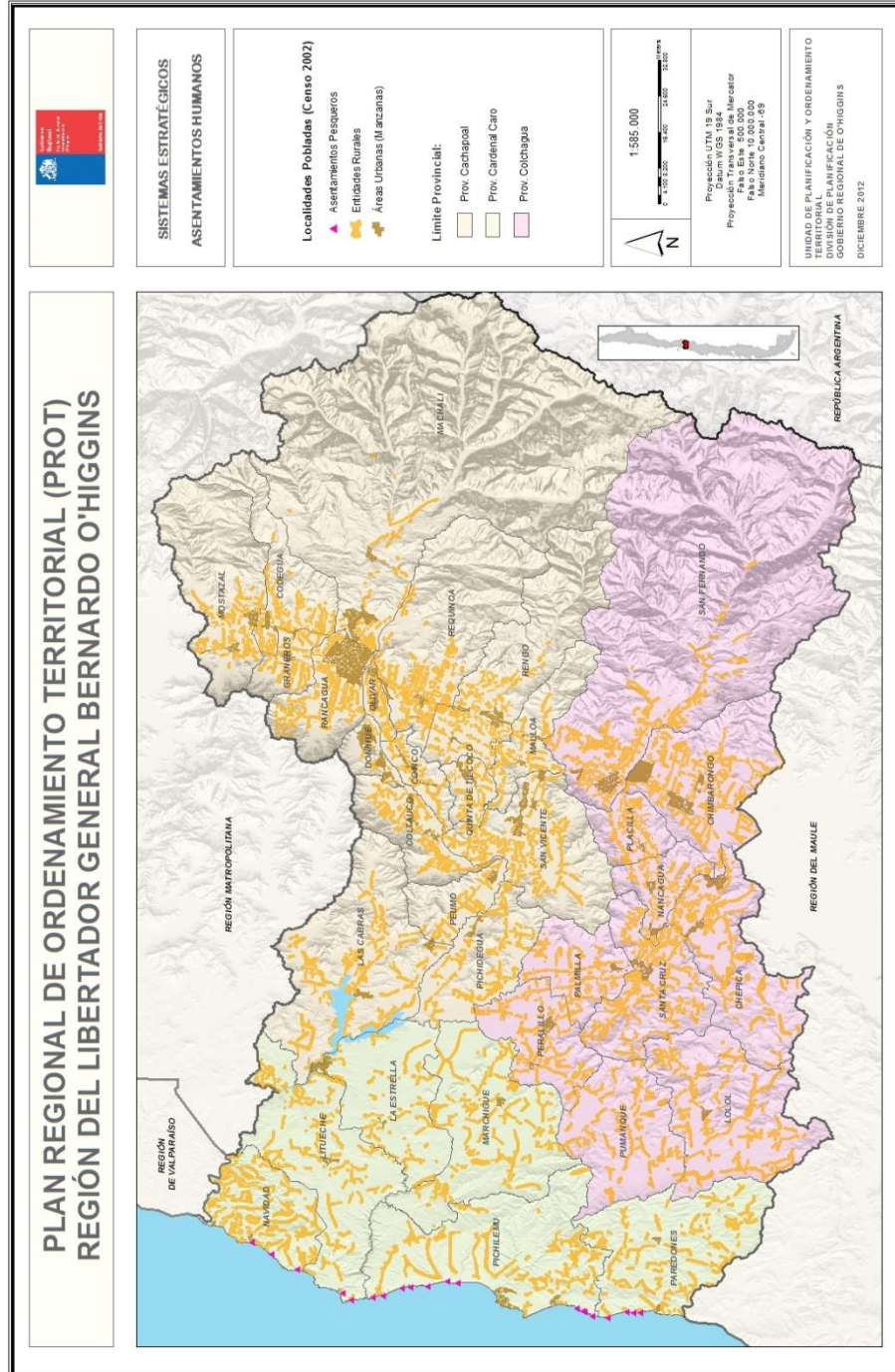


Figura 11. Red de Asentamientos Poblados. Fuente: Gobierno Regional, 2012.



## 4. PELIGRO VOLCÁNICO.

### 4.1 Resumen Ejecutivo.

Los antecedentes geológicos de los volcanes de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins son escasos en comparación con aquellos disponibles para los volcanes más activos del territorio nacional. Asimismo, existían solo evaluaciones regionales de primer orden del peligro volcánico para los centros activos de la región.

En este estudio se ha hecho una revisión exhaustiva de los antecedentes disponibles aplicando una metodología adecuada a la escala de análisis. En primer lugar, se ha reclasificado los volcanes activos restringiendo el conjunto a aquellos que pueden considerarse geológicamente activos: Palomo y Complejo Volcánico Tinguiririca. El volcán Palomo es un centro volcánico sin actividad evidente en el Holoceno tardío, aunque en las inmediaciones de él se encuentra el volcán Andrés, un centro monogénico postglacial. El Complejo Volcánico Tinguiririca es un centro múltiple integrado por una serie de centros independientes y presenta indicios de actividad al inicio del siglo XX. Por otra parte, el volcán Maipo, situado en la zona oriental de la Región Metropolitana y considerado inicialmente una potencial fuente de peligros para la región, no parece afectarla de manera evidente según concluye este estudio.

En consecuencia, el historial eruptivo y otros rasgos geológicos muestran que los volcanes Palomo y Complejo Volcánico Tinguiririca podrían generar desde erupciones estrombolianas (máficas) débiles (IEV 2-3) a subplinianas (silíceas) menores (IEV 3-4). Esas características sugieren que los peligros se concentran en la zona proximal considerada de Alto Peligro (radio de ca. 12 km) y consisten básicamente en el escurrimiento de lavas, dispersión de piroclastos balísticos en el radio interno de 3-5 km y generación de lahares. Esta zona alcanza una superficie de ca. 175 km<sup>2</sup> y corresponde al 1,06% de la superficie regional. La zona de Moderado Peligro (radio de 15-20 km) corresponde a aquella que podría ser afectada por lahares de mayor volumen pero baja probabilidad de ocurrencia relativa en un área que alcanza los 457

km<sup>2</sup> y constituye el 2,78% de la superficie regional. A su vez, la zona de Bajo Peligro (radio externo de ca. 40 km) corresponde al área que podría ser excepcionalmente afectada por lahares de volumen mayor al observado históricamente en los Andes del Sur, cuya probabilidad de ocurrencia es muy baja. En esta zona pueden percibirse efectos secundarios de los procesos ocurridos en la zona proximal tales como crecidas de río e inundaciones y aumento de la carga de sedimentos. Esta zona presenta una superficie de 1458 km<sup>2</sup> y corresponde al 8,89% de la superficie regional.

La exposición o vulnerabilidad frente al peligro volcánico es relativamente baja en la región si se la compara con otras regiones del país. En efecto, aproximadamente el 4% de la superficie regional estaría expuesta al impacto directo de las erupciones mientras a nivel nacional el promedio alcanza ca. 17%. Asimismo, no se reconoce infraestructura relevante en la zona de Alto Peligro, solo la central San Andrés (40 MW) se encontraría en la zona de Moderado Peligro y una escasa población se encontraría presente en la zona de Bajo Peligro.

Una serie de recomendaciones básicas pueden resumirse en restricciones a la infraestructura en la zona de Alto Peligro y condiciones para el desarrollo de asentamientos humanos e infraestructura en las zonas de Moderado y Bajo Peligro.

## 4.2 Introducción.

La Región del Libertador General Bernardo O'Higgins incluye en su territorio, de acuerdo a las fuentes citadas, una serie de estructuras volcánicas con características morfológicas contrastantes. Estas características, particularmente en lo referido al grado de erosión y presencia de manifestaciones eruptivas recientes, son esenciales para el análisis de los peligros volcánicos asociados.

Por otra parte, la literatura científica disponible sobre los volcanes de la región es escasa y algo antigua si se compara con aquella disponible para otros centros volcánicos mejor estudiados. En consecuencia, existe un alto grado de incertidumbre en la evaluación que pueda hacerse y ésta es una condición que ineludiblemente debe considerarse. Por ejemplo, el informe GFDRR (2011) dedica una sección especial al tratamiento de la incertidumbre que en este estudio se adaptará a las condiciones concretas de la información. Sobre la base de una serie de criterios explícitamente indicados, los volcanes y procesos eruptivos reconocidos en la región han sido catalogados y analizados cuantitativamente para arribar a un diagnóstico objetivo de la situación. En primera aproximación, trabajos previos (Silva, 2011; Lara *et al.*, 2011) sugieren que la superficie potencialmente amenazada en la región alcanza entre 6% (impacto directo o de mayor probabilidad de ocurrencia) y 16 % (impacto indirecto o de menor probabilidad de ocurrencia).

### 4.2.1 Objetivo General.

El presente estudio tiene por objetivo central proveer información básica relacionada con peligros volcánicos de la región a partir de los antecedentes disponibles y su análisis. El objetivo final es aportar antecedentes de esta dimensión para su incorporación en el Plan Regional de Ordenamiento Territorial (PROT) que elabora el Gobierno Regional.

#### 4.2.2 Objetivo Específico.

El presente estudio tiene por objeto la recopilación, sistematización e interpretación de la información relevante relacionada con el riesgo volcánico a escala regional. En particular, este trabajo reunirá antecedentes geológicos y otros que permitirán apreciar la magnitud de la amenaza en términos de los procesos y su expresión en la región. Específicamente, el estudio contempla sistematizar la información de base que describe los volcanes activos y sus eventuales erupciones, así como el alcance de sus efectos ofreciendo un resultado sintético alineado con el objetivo central.

### 4.3 Antecedentes Generales.

#### 4.3.1 Definiciones Previas. (modificado de Lara et al., 2011 y referencias en él).

##### 4.3.1.1 Volcán, Complejo Volcánico o Grupo Volcánico.

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

##### 4.3.1.2 Volcán Activo.

En Chile, de acuerdo a la nomenclatura introducida por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), un volcán es **geológicamente** activo si existe evidencia de algún episodio eruptivo ocurrido en Holoceno o bien cuando, sin certeza

de lo anterior, el volcán presenta algún signo de actividad medible como desgasificación, microsismicidad o deformación del terreno (Lara *et al.*, 2011). Aunque existen otras definiciones, algunas incluso más restrictivas, SERNAGEOMIN ha adoptado esta nomenclatura para establecer prioridades a nivel nacional siguiendo la experiencia del U.S. Geological Survey (Ewert *et al.*, 2005).

#### **4.3.1.3 Peligro volcánico.**

Probabilidad de ocurrencia de un proceso en un tiempo y lugar determinado con una intensidad definida. En términos prácticos, un mapa de peligros volcánicos representa las áreas potencialmente afectadas por los diferentes procesos volcánicos indicando su probabilidad de ocurrencia relativa.

#### **4.3.1.4 Vulnerabilidad.**

Susceptibilidad al impacto que presentan los elementos potencialmente afectados. Ella puede expresarse de variadas formas según el elemento que se considere, aunque comúnmente se indica como porcentaje de daño esperado.

#### **4.3.1.5 Riesgo (*sensu stricto*).**

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

#### **4.3.1.6 Riesgo Específico.**

Combinación de factores asociados con el peligro intrínseco que representa cada volcán y la exposición del territorio potencialmente afectado. Según la definición provista por UNESCO (UNDRO, 1979), el riesgo específico hace referencia a las pérdidas potenciales en un intervalo de tiempo y un área geográfica determinados.

#### 4.3.1.7 Tipología de Erupciones (general).

Las erupciones volcánicas se clasifican generalmente según su grado de explosividad (ver Índice de Explosividad Volcánica), volumen y otros factores que las caracterizan. Las erupciones hawaiianas y estrombolianas son erupciones débiles mientras que las subplinianas, plinianas y ultraplínianas son moderadas a severas. Las erupciones vulcanianas son un tipo particular caracterizado por la interacción de magma y agua.

IEV	Clasificación	Descripción	Altura columna eruptiva	Volumen material arrojado	Periodicidad	Ejemplo	Total erupciones históricas
0	Erupción hawaiiana	no-explosiva	< 100 m	> 1000 m <sup>3</sup>	diaria	Kilauea	-
1	Erupción stromboliana	ligera	100-1000 m	> 10,000 m <sup>3</sup>	diaria	Stromboli	-
2	Erupción vulcaniana/ stromboliana	explosiva	1-5 km	> 1.000.000 m <sup>3</sup>	semanal	Galeras, 1993	3477
3	Erupción Vulcaniana (sub-pliniana)	violenta	5-15 km	> 10.000.000 m <sup>3</sup>	anual	Nevado del Ruiz, 1985	868
4	Vulcaniana (sub-pliniana)/ pliniana	cataclísmica	10-25 km	> 0,1 km <sup>3</sup>	cada 10 años	Galunggung, 1982	278
5	Pliniana	paroxística	> 25 km	> 1 km <sup>3</sup>	cada 100 años	St. Helens, 1980	84
6	Pliniana/ Ultra-Pliniana (krakatoana)	colosal	> 25 km	> 10 km <sup>3</sup>	cada 100 años	Krakatoa, 1883 Santa María, 1902	39
7	Ultra-Pliniana (krakatoana)	super-colosal	> 25 km	> 100 km <sup>3</sup>	cada 1.000 años	Tambora, 1815 Maipo, 500.000 a. C.	4
8	Ultra-Pliniana (krakatoana)	mega-colosal	> 25 km	> 1000 km <sup>3</sup>	cada 10.000 años	Toba, 69.000 a. C.	1

*El conteo de erupciones históricas está actualizado hasta 1994 de acuerdo al Global Volcanism Program del Instituto Smithsonian*

Tabla 12. Tipología de Erupciones. Fuente: Modificado de [www.volcano.si.edu](http://www.volcano.si.edu)

#### 4.3.1.8 Tipología de Erupciones. (Mastinet al., 2010; utilizada en Lara et al., 2011).

En un esfuerzo por caracterizar cuantitativamente los parámetros que definen los diferentes tipos de erupciones, Mastinet *al.* (2010) proponen una reclasificación cuya equivalencia se incluye en la tabla adjunta:

Tipo	IEV	Altura columna(km)	Duración (h)	Volumen (km <sup>3</sup> )
M0, máfica estándar	0-1	7	60	0,01
M1, máfica menor	~2	2	100	0,001
M2, máfica moderada	~3	7	60	0,01
M3, máfica mayor	3-4	10	5	0,17
S0, silíceo estándar	3	11	3	0,015
S1, silíceo menor	3-4	5	12	0,003
S2, silíceo moderada	4-5	11	3	0,015
S3, silíceo mayor	6-7	15	8	0,15

Tabla 13. Caracterización cuantitativa de erupciones. Fuente: Modificado de Mastinet *al.*, (2010)

#### 4.3.1.9 Índice de Explosividad Volcánica (IEV).

Valor que estima la magnitud de una erupción volcánica (*sensu*Newhall y Self, 1982) definido por factores tales como altura de la columna eruptiva y volumen total emitido. Existen otras fórmulas para estimar la magnitud de una erupción pero ésta es probablemente la más conocida y utilizada porque puede aplicarse a partir de observaciones directas de un ciclo eruptivo o a partir de estudios de campo en erupciones antiguas.

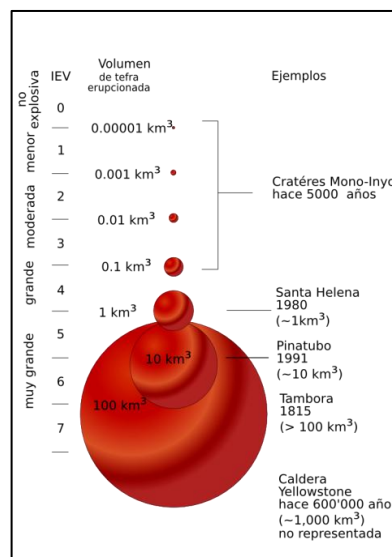


Figura 12. Índice de Explosividad Volcánica.3 Fuente: Modificado de [www.volcano.si.edu](http://www.volcano.si.edu)

#### 4.3.1.10 Peligros volcánicos a ser estudiados.

En términos generales, una erupción volcánica puede incluir una serie de procesos peligrosos como:

- Proyección de piroclastos balísticos
- Dispersión y caída de piroclastos
- Emisión de lava
- Generación de flujos y oleadas piroclásticas
- Generación de lahares e inundaciones
- Colapso total o parcial del edificio volcánico
- Emisión de gases
- Ocurrencia de sismos volcánicos
- Ocurrencia de deformación del terreno
- Alteraciones físico-químicas de cursos de agua, acuíferos y sistemas geotérmicos

La importancia o influencia que cada uno de ellos presenta en un escenario concreto dependerá del volcán específico y de las características que se conjuguen en un escenario eruptivo real.

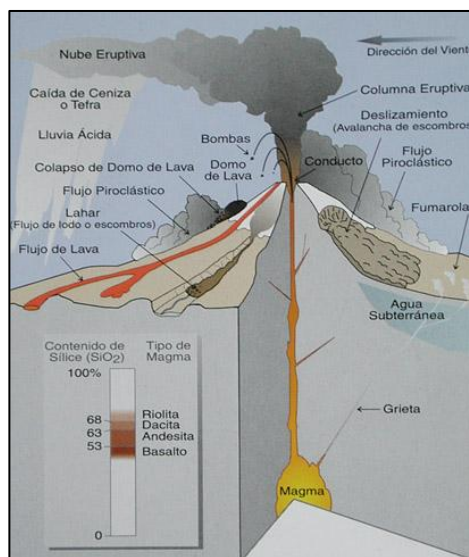


Figura 13. Gráfica de Peligros Volcánicos. Fuente: Modificado de [www.volcanoes.usgs.gov](http://www.volcanoes.usgs.gov)



## 4.4 Línea Base de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

### 4.4.1 Generalidades.

En este capítulo se incluye los antecedentes generales disponibles en la literatura sobre la geología y el volcanismo de la región. Una reseña de la geología regional se presenta en la primera sección mientras en la siguiente se discute el catálogo de los volcanes activos.

### 4.4.2 Geología Regional.

La región cordillera en las cercanías de los volcanes modernos corresponde a un relieve orogénico construido durante la fase principal de alzamiento al inicio del Mioceno (*e.g.*, Armijo *et al.*, 2010). Desde la perspectiva del volcanismo, la configuración geológica de la corteza determina ciertos rasgos geoquímicos de los magmas y sus estructuras ofrecen canales de ascenso para ellos. En esta región se ha sugerido que parte de la evolución magmática se explica en las restricciones que ofrece una corteza formada por un zócalo superior formado por las secuencias volcano-sedimentarias que definen el núcleo de la cordillera (Cembrano y Lara, 2009) y cuyas unidades más representativas se describen a continuación sobre la base de la compilación propuesta en el Mapa Geológico de Chile escala 1:1.000.000 (SERNAGEOMIN, 2002).

Las unidades cuaternarias de la zona de estudio (Q1) corresponden principalmente a depósitos aluviales, coluviales, fluvioglaciares y depósitos volcanoclásticos que se emplazan fundamentalmente a lo largo de los valles. Los principales centros volcánicos de la zona se ubican en el sector oriental y corresponden en esta compilación a las unidades PI3 y PPI3 incluyendo algunas unidades volcánicas más antiguas o edificios volcánicos ancestrales. El basamento de los edificios volcánicos corresponde a una faja plegada integrada por rocas meso-cenozoicas intruidas a su vez por granitoides del Mioceno. Las rocas estratificadas que forman la franja más intensamente deformada

corresponden a las formaciones Colimapu (Kia1c) de carácter continental; Baños del Flaco (JK1m) de naturaleza marina litoral; y Río Damas (Js1c) con rasgos continentales transicionales. En tanto, el núcleo de la cordillera está formado por lavas basálticas y dacíticas con intercalaciones de tobas y rocas sedimentarias del Oligoceno-Mioceno (OM2c). Estas unidades son intruidas por granitoides de edad miocena (Msg; Mg).

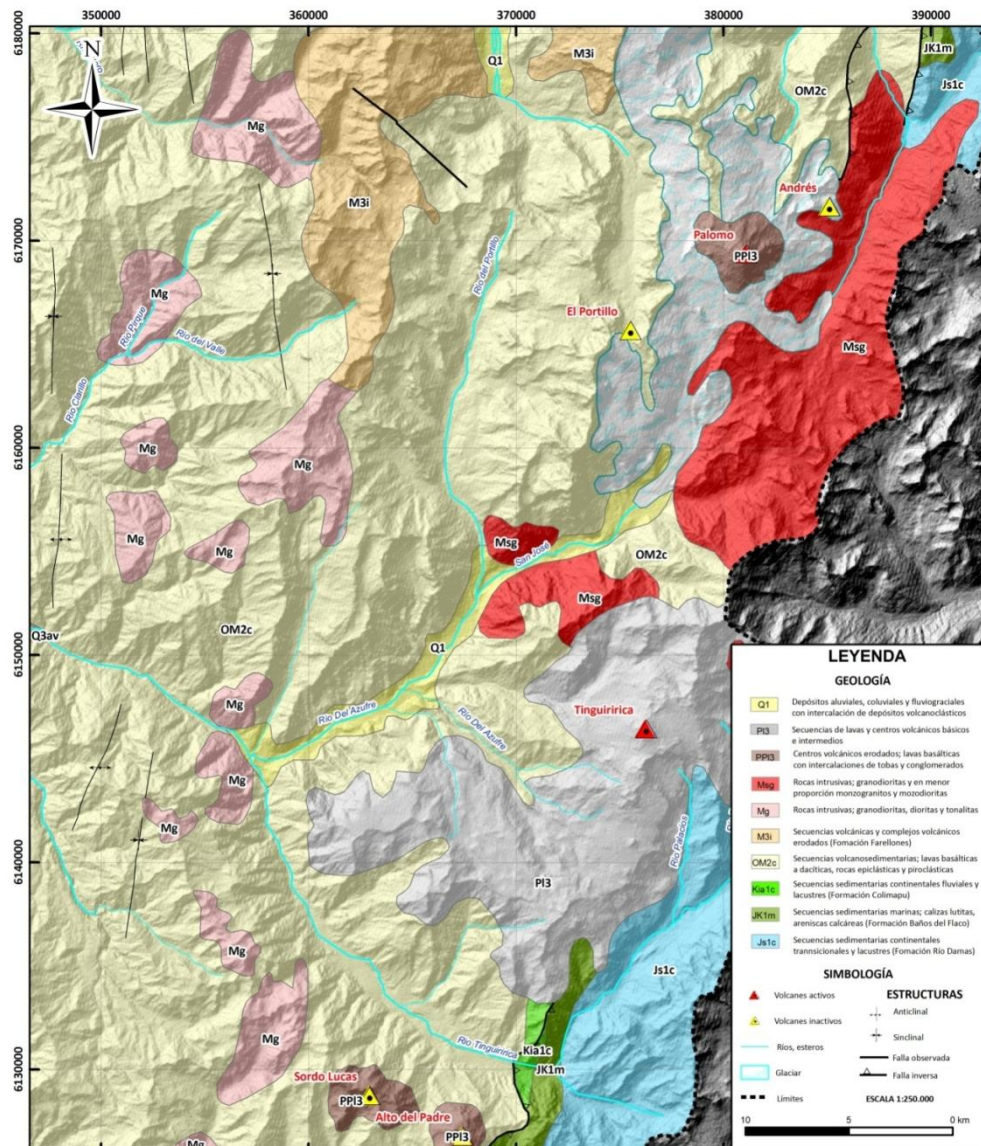


Figura 14. Mapa Geológico de la zona de estudio escala 1:250.000. Las diferentes unidades descritas en el texto presentan las siguientes edades Q1: Pleistoceno-Holoceno, PPI3: Plioceno-Pleistoceno; Msg: Mioceno Superior (13-7 Ma); M3i: Mioceno Inferior-Medio; OM2C: Oligoceno-Mioceno; Kia1c: Cretácico Inferior Alto (Aptiano-Cenomaniano); JK1m: Cretácico Inferior (Neocomiano); Js1c: Jurásico Superior. Fuente: Modificado de SERNAGEOMIN (2002).

#### 4.4.3 Volcanismo Cuaternario.

En esta sección se reporta los antecedentes reunidos fundamentalmente en las compilaciones de González-Ferrán (1995) y Siebert *et al.* (2010). Cabe destacar que mientras el primero corresponde a un texto de divulgación científica, el segundo es un compendio técnico que se basa en la información reportada por otros autores y da cuenta cabal del conocimiento geológico disponible para cada volcán. En algunos casos, la incertidumbre asociada a esta información es importante. El catálogo incluido en la sección siguiente es aquel construido en sentido *lato* antes de la clasificación propuesta en la sección subsiguiente y por lo tanto incluye todos los centros volcánicos citados en la literatura científica, independiente de su status en términos de actividad. Algunas modificaciones menores fueron introducidas respecto de lo citado en las fuentes solo con fines de clarificación.

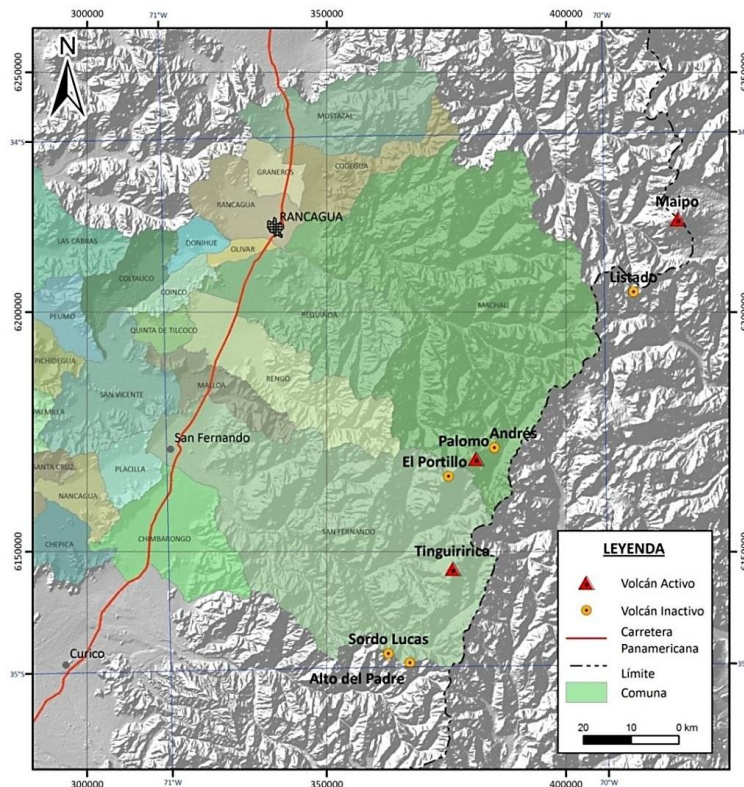


Figura 15. Mapa de ubicación de los volcanes del área de estudio y las comunas del sector oriental de la región. Fuente: Elaboración propia a partir de datos públicos. Ubicación de volcanes modificada de González-Ferrán (1995).

#### 4.4.4 Catálogo de Volcanes.

##### 4.4.4.1 Volcán Maipo.

Estratovolcán edificado en el interior de la caldera Diamante. Alcanza 1900 m sobre su base y su construcción se habría iniciado hace *ca.* 90 ka (Sruogaet *al.*, 2005). Los magmas evacuados son de composición andesítico-basáltica a dacítica. El estratovolcán presenta algunos centros de flanco alineados en dirección NE-SW. Asimismo, en la pared interna de la caldera, separado del estratovolcán, se edificó el volcán Don Casimiro (Charrier, 1979), que corresponde a un centro monogénico independiente.

Tanto Mastinet *al.* (2010) como Lara *et al.* (2011) consideran que este volcán es susceptible de iniciar erupciones del tipo S1 o menores (ver sección 2.2.8). Lavas y lahares son los peligros más evidentes en el área proximal y hasta un radio no superior a 50 km. Columnas eruptivas de altura superior a 10 km (Lara *et al.*, 2011) representan un escenario razonable en el contexto de sus erupciones características. Flujos piroclásticos de envergadura moderada (alcance <10 km) podrían generarse en esas condiciones.

El volcán Maipo presenta un significativo registro eruptivo histórico (1788?, 1822, 1826, 1829, 1831, 1833, 1869, 1908, 1912) aunque la documentación de esos eventos es dudosa. El último evento eruptivo relevante sería aquel de 1826 (Hantke, 1961) durante el cual habrían formado los conos parásitos del flanco oriental que embalsan la Laguna Diamante.



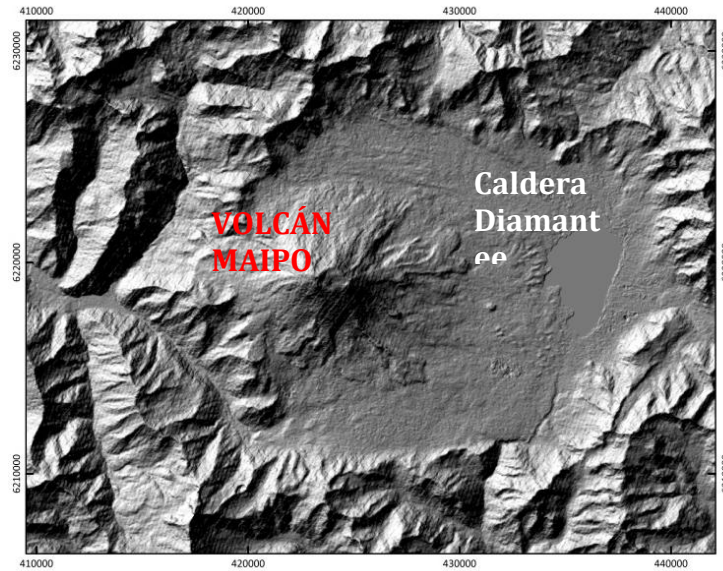


Figura 16. Imagen ASTER del Volcán Maipo y su caldera (tomado de asterweb.jpl.nasa.gov)

#### **4.4.4.2 Volcán Listado.**

Estratovolcán con profunda erosión glacial (Charrier, 1981). Las coordenadas reportadas por González-Ferrán (1995) no corresponden a una estructura volcánica cuaternaria sino a un núcleo fuertemente erosionado que podría corresponder a un edificio volcánico antiguo o a una zona de alteración desarrollada en el basamento cenozoico.

#### **4.4.4.3 Volcán Andrés.**

Cono de piroclastos de reducidas dimensiones situado al NE del volcán Palomo (Charrier, 1979). Presenta un cráter elíptico de 500 m de diámetro y habría evacuado magmas de composición andesítica. Corresponde a un centro eruptivo probablemente monogénico, independiente de los estratovolcanes mayores. Su estilo eruptivo es propio de centros menores con erupciones de envergadura mínima (M1). La morfología de las lavas sugiere emplazamiento postglacial. No presenta indicios de actividad histórica. Por tratarse de un centro aislado, probablemente monogénico, presenta una baja probabilidad de reactivación.

#### 4.4.4.4 Volcán Palomo.

Estratovolcán compuesto de un cono anidado en otro mayor. Alcanza 600 m sobre su base y su morfología sugiere que la construcción del edificio se habría iniciado en el Pleistoceno extendiéndose a parte del Holoceno (González-Ferrán, 1995). Los magmas evacuados serían de composición andesítico-basáltica a dacítica. Mastinet *et al.* (2010) consideran que este volcán es susceptible de iniciar erupciones menores tipo S0 mientras Lara *et al.* (2011) amplían el espectro a erupciones silíceas menores del tipo S1.

Lavas y lahares son los peligros más evidentes en el área proximal y hasta un radio no superior a 50 km. Columnas eruptivas de altura superior a 10 km representan un escenario razonable en el contexto de sus erupciones características. Flujos piroclásticos de envergadura moderada (alcance <10 km) podrían generarse en esas condiciones. El volcán Palomo no presenta indicios de actividad eruptiva histórica.

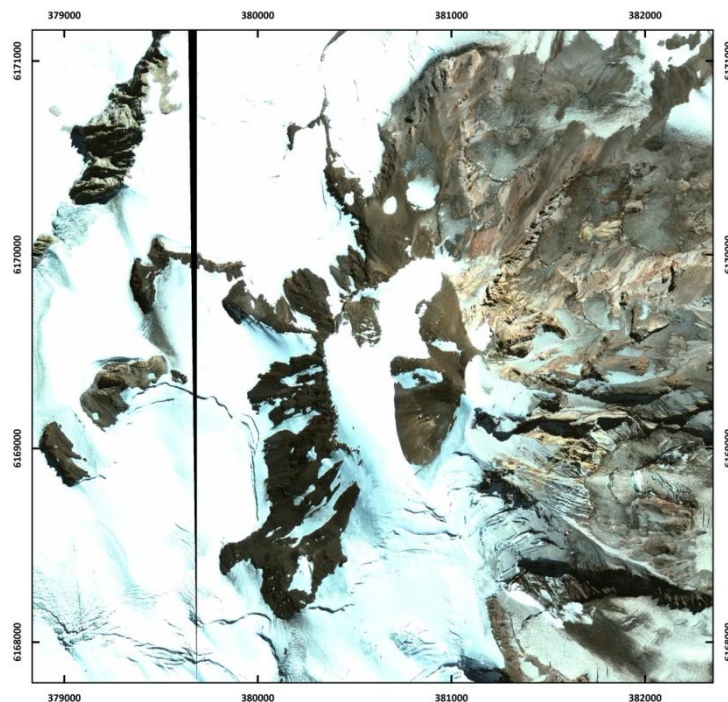


Figura 17. Imagen Quickbird del volcán Palomo.



#### 4.4.4.5 Volcán El Portillo.

Estratovolcán con profunda erosión glacial (González-Ferrán, 1995). Las coordenadas reportadas no corresponden a una estructura volcánica cuaternaria sino a un núcleo fuertemente erosionado que forma actualmente un circo glacial.

#### 4.4.4.6 Complejo Volcánico Tinguiririca.

Conjunto de centros eruptivos que forman un alineamiento volcánico de rumbo NNE y 20 km de longitud. Alrededor de 10 centros eruptivos integran esta cadena entre los que destacan los conos Montserrat, Tinguiririca, Azufreras, Fray Carlos, Natalia, Don Cucho y Los Guzmanes. El cono Tinguiririca es el de mayor altura y de actividad más reciente, seguido de Fray Carlos. Los magmas evacuados desde los diferentes edificios son de composición andesítico-basáltica a dacítica. Mastinet *et al.* (2010) consideran que este volcán es susceptible de iniciar erupciones tipo S0 mientras Lara *et al.* (2011) amplían el espectro a erupciones silíceas menores del tipo S1 que aquí son expresadas como su equivalente máfico M1.

Lavas y lahares son los peligros más evidentes en el área proximal y hasta un radio no superior a 50 km. Godoy *et al.* (1994) describen la denominada 'Avalancha del Tinguiririca' que corresponde a una avalancha no volcánica generada aparentemente por deslizamiento de una zona de alteración y cuya conexión genética con el complejo no ha sido verificada. Columnas eruptivas de altura superior a 10 km representan un escenario razonable en el contexto de sus erupciones características del Complejo Volcánico Tinguiririca. Flujos piroclásticos de envergadura moderada (alcance < 10 km) podrían generarse en esas condiciones. El volcán Tinguiririca habría presentado actividad eruptiva en 1917 (Sapper, 1927). No obstante los antecedentes anteriores, el EIA de la Central San Andrés ([www-e-seia.cl](http://www-e-seia.cl)) asume que el volcán Tinguiririca es de tipo 'pasivo' estimando un bajo peligro en el área.

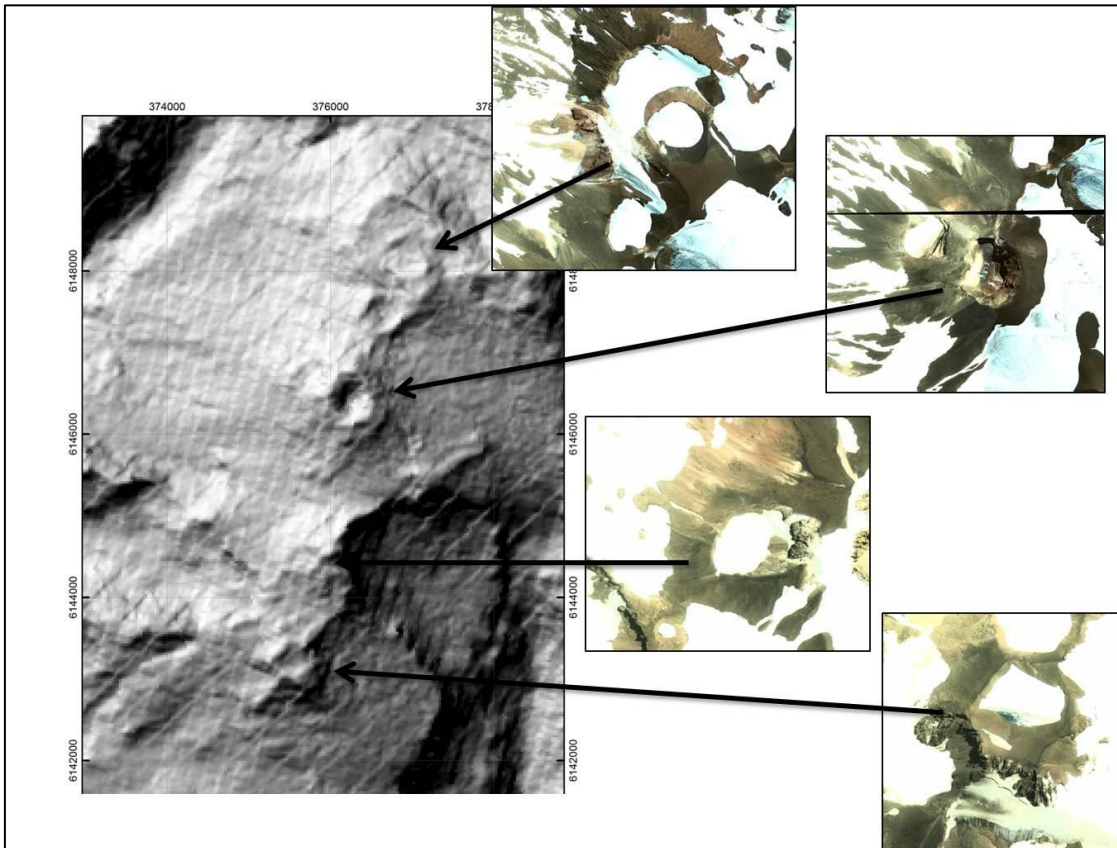


Figura 18. Modelo ASTER GDEM V2 con indicación del conjunto de centros eruptivos que forman el alineamiento volcánico de rumbo NNE integrado por los centros Montserrat, Tinguiririca, Fray Carlos, Don Cucho indicados en extracto de imagen Quickbird.

#### 4.4.4.7 **Volcán Sordo Lucas.**

Estratovolcán con profunda erosión glacial (González-Ferrán, 1995). Las coordenadas reportadas corresponderían a una estructura desmantelada que podría corresponder a un edificio volcánico pre-cuaternario o a una zona de alteración desarrollada en el basamento cenozoico.

#### 4.4.4.8 **Volcán Alto del Padre.**

Estratovolcán erosionado que alcanza 500 m sobre su base. Su morfología sugiere que la construcción del edificio se habría iniciado en el Pleistoceno sin indicios evidentes de

actividad holocena. Arcos *et al.* (1988) fechan su base en ca. 1 Ma. Los magmas evacuados serían de composición andesítica a dacítica.

A continuación se incluye la Tabla 14. que contiene la información detallada de los volcanes cuaternarios que tienen influencia en la región:

Volcán	Código GVN	UTM N	UTM E	Altitud (msnm)	Tipo	Categoría	Edad	Erupción tipo	Actividad histórica	Rango SiO <sub>2</sub>	Referencias
<i>Región Metropolitana</i>											
Maipo	1507-021	6219349,04	423205,01	5256	EVC	A	Q	S1	1869	B-D	Brüggen (1950); Hantke (1961); Sruoga et al. (2005)
Listado		6204185,57	414111,47	4250	EV	I	PQ			A-R	Charrier (1981)
<i>Región del Libertador General Bernardo O'Higgins</i>											
Andrés		6171647,62	385057,64	3372	CP	I	Q	M1		A	Charrier (1979)
Palomo	1507-022	6169367,55	381060,21	4850	EV	A	Q	M1-S1			González-Ferrán (1995)
El Portillo		6165678,53	375472,20	4042	EV	I	PQ				González-Ferrán (1995)
Tinguiririca	1507-03	6146440,64	376223,50	4280	EV	A	Q	M1-S1	1917	A-D	Sapper (1917);
Sordo Lucas		6128746,80	362889,83	3535	EV	I	PQ			A	Klohn (1960)
Alto del Padre		6126784,54	367394,41	3548	EV	I	Q			A-D	Davidson (1971); Arcos et al. (1988)
<b>Notas:</b>											
<i>Categoría</i>		<i>Edad</i>			<i>Erupción tipo (ver texto)</i>			<i>Rango SiO<sub>2</sub></i>			
EVC: Estratovolcán compuesto		Q: Cuaternario (<2,8 Ma)			S1: Sílice menor			B: Basaltos (48-52% SiO <sub>2</sub> )			
EV: Estratovolcán		PQ: Plioceno-Cuaternario (<5,3 Ma)			M1: Máfica menor			A: Andesitas (52-56 % SiO <sub>2</sub> )			
CP: Cono de piroclastos								D: Dacitas (56-64 % SiO <sub>2</sub> )			
Código GVN (ver <a href="http://www.volcano.si.edu">www.volcano.si.edu</a> )								R: Riolitas (>70% SiO <sub>2</sub> )			

Tabla 14. Catálogo de volcanes cuaternarios con influencia en la Región de O´Higgins.

#### 4.5 Clasificación de Los Volcanes.

Para efectos del análisis a desarrollar en este estudio, y siguiendo las definiciones introducidas por Lara *et al.* (2011) a escala nacional, se ha procedido a clasificar los centros volcánicos registrados en la literatura con los siguientes criterios:

a) Se considerará **activos** a aquellos que presentan actividad comprobada en el Holoceno o que al menos presentan morfología parcialmente libre de erosión glacial intensa.

b) No se considerará activos a aquellos centros monogénicos o aislados a menos que constituyan conjuntos de 2 o más centros o bien manifiesten actividad eruptiva reciente y persistente.

Con esta definición, los volcanes Palomo y Complejo Volcánico Tinguiririca son los centros eruptivos de interés en la región. Para efectos del análisis, se ha considerado también los potenciales efectos del volcán Maipo, situado en la Región Metropolitana.

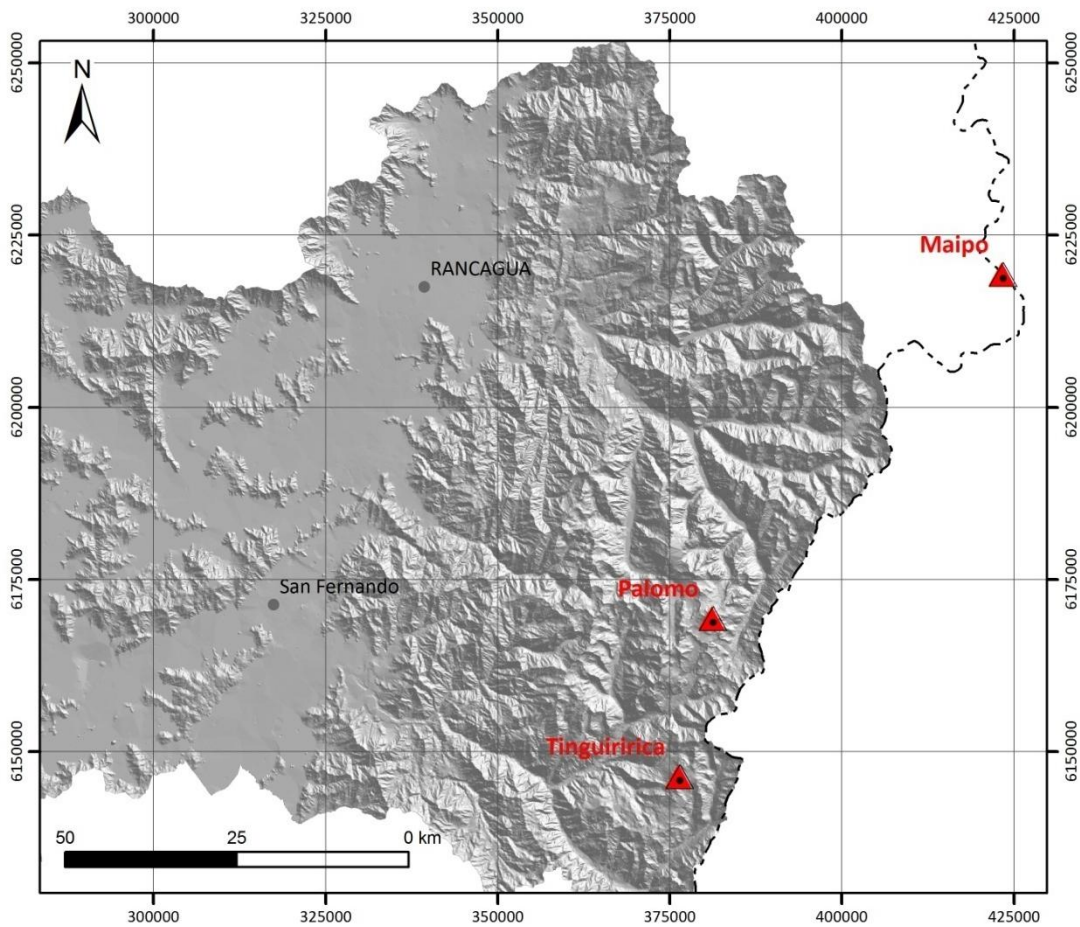


Figura 19. Volcanes activos definidos en el área de estudio. Fuente: Elaboración propia a partir de datos públicos. Ubicación de volcanes modificada de González-Ferrán (1995).

## 4.6 Metodología

Existen diferentes aproximaciones para evaluar el peligro volcánico, las que dependen esencialmente de la escala de análisis y de la disponibilidad de antecedentes geológicos. Por otra parte, el surgimiento de nuevas herramientas de análisis basadas en el uso intensivo de SIG y modelos físicos o empíricos *ad hoc*, permite hoy un examen más objetivo y cuantitativo del impacto que podrían causar las erupciones volcánicas futuras en un área específica. Un resumen de algunos avances en la materia pueden revisarse en las presentaciones del último Congreso Geológico Chileno 2012 (e.g., Amigo *et al.*, 2012; Orozco *et al.*, 2012).

En la primera fase de este trabajo se ha optado por utilizar una metodología general como la propuesta por GFDRR (2011) por encargo del Banco Mundial ([www.gfdr.org](http://www.gfdr.org)). En una segunda etapa, el análisis fue refinado con la aplicación de un criterio adicional basado en el concepto de 'Línea de Energía' de (Malin y Sheridan, 1982). Esta última metodología es apropiada para la representación de la mayoría de los procesos volcánicos cuya movilidad es controlada por la gravedad.

El resultado del primer análisis es una estimación de primer orden del área de peligro y representa una sobreestimación del área de impacto real. En efecto, los flujos de detritos (lahares) y también las corrientes densas de piroclastos (flujos piroclásticos) se desplazan preferentemente por el fondo de los valles y solo excepcionalmente superan la divisoria de aguas en una subcuenca. Sin embargo, esta aproximación es útil para situar la magnitud del problema e identificar las cuencas más sensibles. El método de la 'Línea de Energía' refina esta evaluación y es suficiente para la escala de análisis. En efecto, similar aproximación se ha utilizado en la Zona Volcánica Central de los Andes para la que el Programa de Riesgo Volcánico de SERNAGEOMIN ha elaborado cartografía de peligros de escala 1:250.000 (Amigo *et al.*, 2012).

Para un análisis de mayor detalle existen herramientas específicas que permiten simular el área inundada por lahares (e.g., Schilling, 1998) o escurrimiento de lavas (Harris y Rowland, 2001)

Por otra parte, la dispersión y acumulación de material piroclástico, cuyo desarrollo es habitualmente explicado con modelos de advección-difusión, han sido analizadas desde una perspectiva general de la forma en que Lara *et al.* (2011) analizan este proceso en una cartografía de escala nacional. Básicamente, el método consiste en la definición de una altura crítica de dispersión sobre la base de los antecedentes geológicos (ver Tabla 2) sumada a una estimación estadística de las condiciones dominantes del viento a esa altura. Por último, una erupción tipo (de volumen y distribución conocida) es utilizada para definir la envolvente de 1 cm de espesor depositado que se considera como el umbral a partir del cual la zona interna presenta algún impacto relacionado.

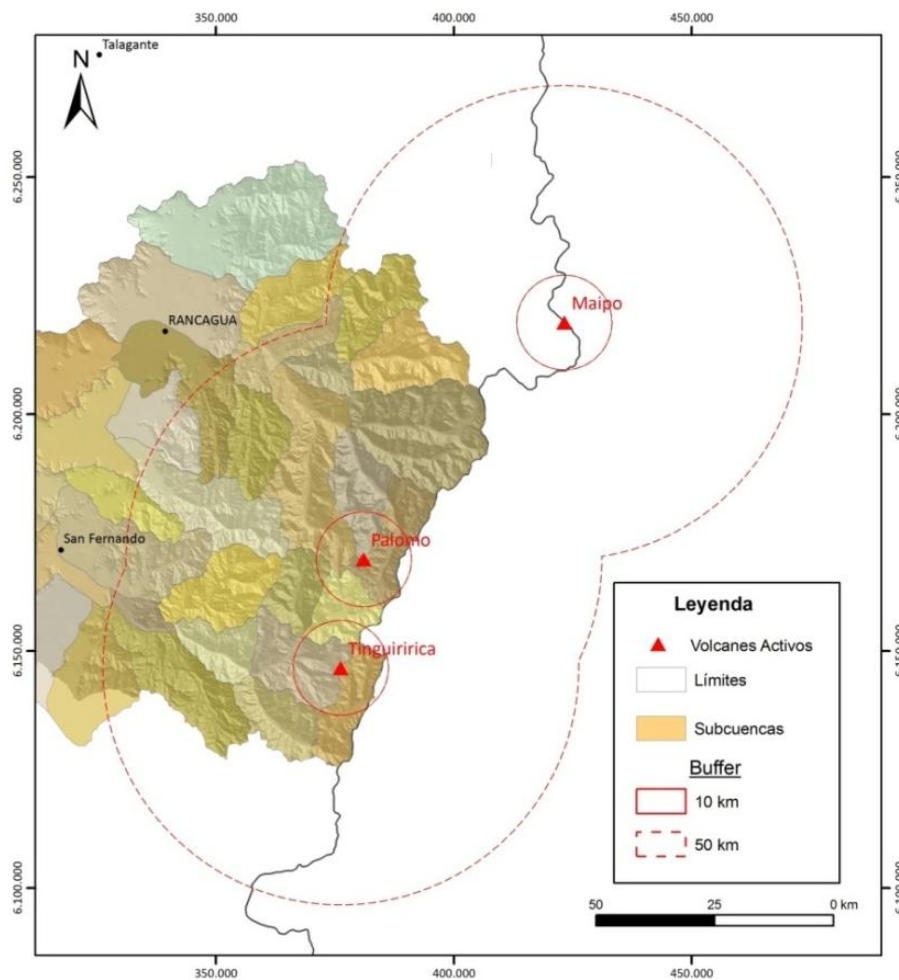


Figura 20. Mapa de ubicación de las subcuencas en el área de estudio con indicación de los *buffers* utilizados en la evaluación del peligro de lahares. Fuente: Elaboración propia a partir de datos públicos. Ubicación de volcanes modificada de González-Ferrán (1995).



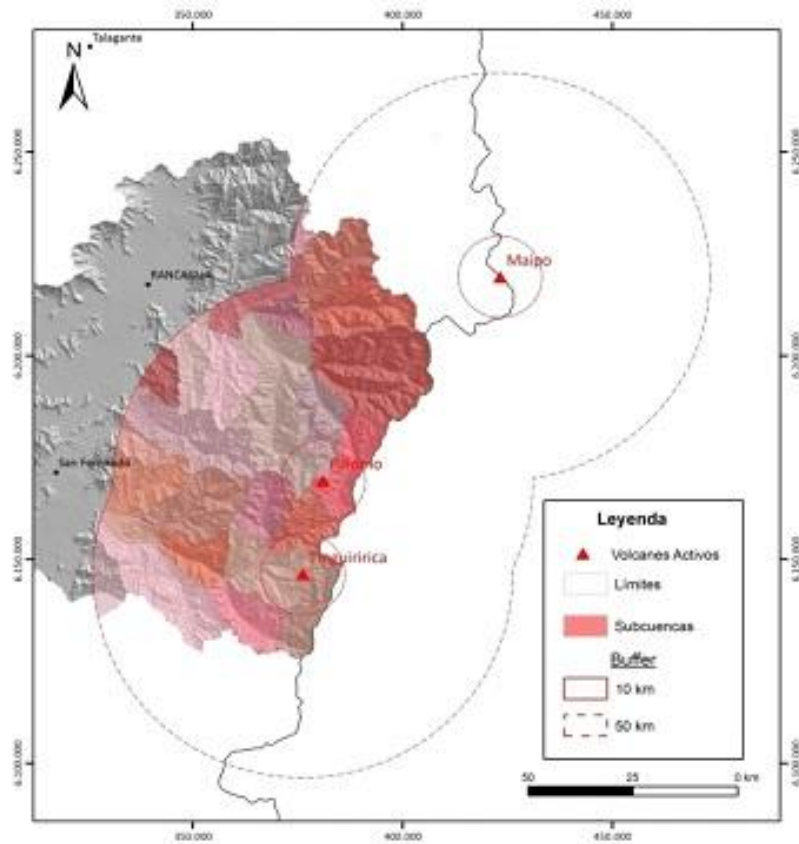


Figura 21. Selección de subcuencas contenidas en el *buffer* externo. Fuente: Elaboración propia a partir de datos públicos. Ubicación de volcanes modificada de González-Ferrán (1995).

Por otra parte, el método de la 'Línea de Energía' consiste en la construcción de conos cuya endiente (razón altura/largo de la base o razón H/L) es representativa de la movilidad de los procesos (e.g., Malin y Sheridan, 1982). En efecto, existiría un valor característico de H/L para cada tipo de flujo. Las avalanchas volcánicas presentan rangos de H/L entre 0,05 y 0,17 mientras los flujos piroclásticos entre 0,07 y 0,52. La modelación con este método tiende a sobreestimar el impacto porque incluye parte de las laderas que solo serían alcanzadas en condiciones excepcionales de flujos con gran movilidad. Asimismo, esta técnica tiende a subestimar el alcance máximo en los cauces (Lara et al., 2011) y por esta razón el análisis se ha hecho combinando este criterio con el buffer externo de 50 km que define el máximo alcance de manera consistente con la literatura disponible (e.g., Blong, 1984). Estos resultados son

dependientes también de las características de modelo de elevación digital (MED) utilizado, que en este caso corresponde al Aster GDEM V2 (detalles en <http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>) cuya resolución horizontal es cercana a 30 m. Por otra parte, los antecedentes de primer orden relativos a la dispersión y caída de piroclastos reportados en Lara *et al.* (2011) sirven para acotar las áreas de impacto de acuerdo a los escenarios propuestos por esos autores. En efecto, los datos meteorológicos históricos compilados del proyecto Reanálisis II (Kanamitsu *et al.*, 2002) sugieren condiciones generales de circulación atmosférica dominadas por vientos del oeste-noroeste que producen patrones de dispersión generales al sureste, cuya información se incluye en Tabla 15 siguiente:

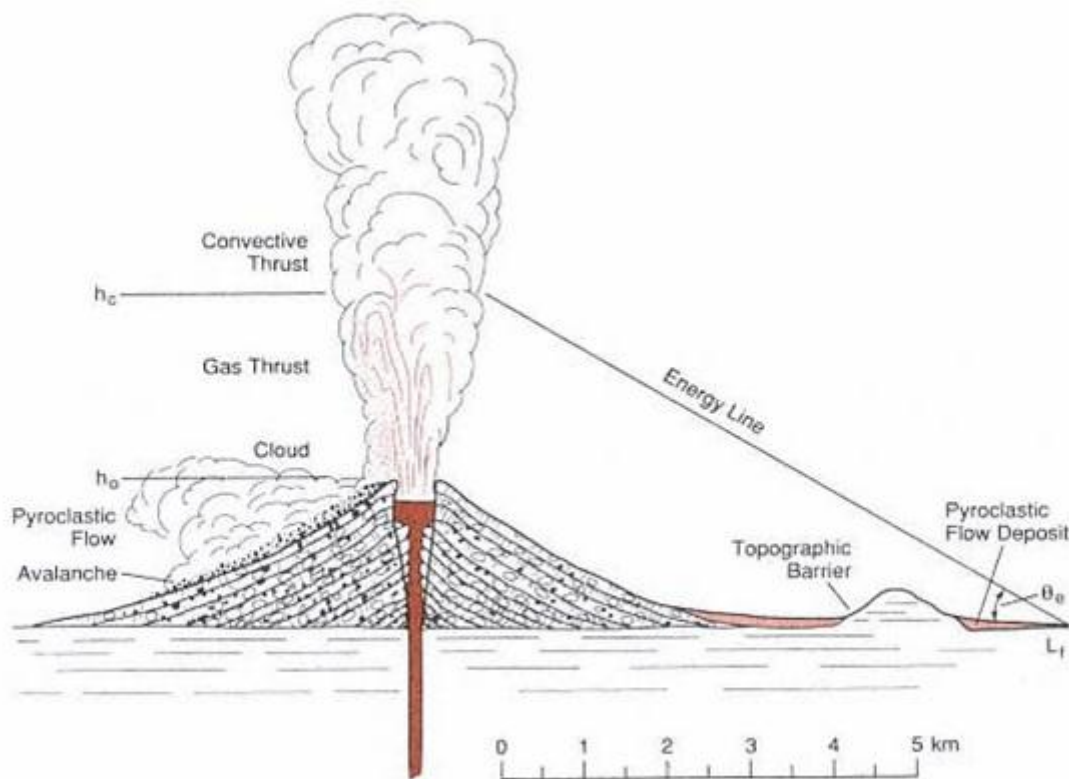


Figura 22. Diagrama de procesos que ilustra el concepto de 'Línea de Energía'. (modificado de Malin y Sheridan 1982). En la figura,  $L_f$  ( $L$ ) es el máximo alcance *orunout* mientras  $h_c$  ( $H$ ) es la altura de colapso y corresponde a la base de la zona convectiva en una columna eruptiva.

Volcán	Código GVN	UTM N	UTM E	Altitud (msnm)	Tipo	Erupción tipo	Actividad histórica	Peligros	Actividad explosiva <5 ka	Área subcuencas amenazadas (km2)	Área de Alto Peligro (km2)	Área de Moderado Peligro (km2)	Área de Bajo Peligro (km2)	Área de Caída de Piroclastos (km2)	Dirección viento dominante	Glaciares	Superficie Glaciares (km2)
Palomo	1507-022	6169367,55	381060,21	4850	EV	M1-S1		Lava y lahares; en menor medida flujos piroclásticos y caída de piroclastos	Desconocida	1252,56	114,54	274,38	931,93	685,13	SE	Universidad Cortaderal Palomo Norte Cpreces	152,81
Tinguiririca	1507-03	6146440,64	376223,50	4280	EV	M1-S1	1917	Lava y lahares; en menor medida flujos piroclásticos y caída de piroclastos	Desconocida	619,29	60,69	183,33	526,19	345,76	SE	Sin nombre	28,57

Fuente: Elaboración propia a partir de datos compilados en González-Ferrán (1995) y Siebert *et al.* (2010) y otros provistos por el Gobierno Regional

Tabla 15. Datos asociados a volcanes activos con influencia en la Región de O´ Higgins Fuente: este estudio, modificado de *Lara et al., 2011*).

El proceso general se resume en el cuadro siguiente:

#### Peligros del Área proximal

- Caracterización del volcán y definición de erupción tipo (IEV, h, Volumen)
- Definición de cuencas vecinas con buffer externo (50 km)
- Definición de cuencas amenazadas con buffer interno (10 km)
- Aplicación de conos H/L (0,25; 0,18; 0,1)
- Análisis de sensibilidad
- Composición SIG

#### Peligros del Área Medio-distal

- Caracterización del volcán y definición de erupción tipo (IEV, h, Volumen)
- Identificación patrones de viento (dirección, frecuencia)
- Definición de envolvente 1 cm según erupción tipo

### **4.7 Análisis Regional del Peligro Volcánico**

En esta sección se presentan los resultados de la evaluación del peligro (amenaza) junto con un análisis de sensibilidad de esos resultados. Adicionalmente se incluye un análisis de la vulnerabilidad a nivel regional en función del peligro (amenaza) declarado, básicamente en términos de la población y la infraestructura con la intención de detectar zonas que pudieran ser sensibles frente a una situación de crisis

volcánica. Finalmente, se complementa el análisis determinístico con una breve sección sobre las probabilidades de ocurrencia de eventos futuros que, aunque de manera muy aproximada por la ausencia de mejores datos, pudiera servir para ofrecer un panorama general sobre el problema.

#### **4.7.1 Peligros volcánicos.**

De acuerdo a las características geológicas de los volcanes Palomo y Complejo Volcánico Tinguiririca, ellos son propensos a generar erupciones estrombolianas del tipo máficas menores a silíceas menores (Mastinet *al.*, 2010; Lara *et al.*, 2011). En complemento, consideraciones morfológicas realizadas en este estudio a partir del examen de la imagen satelital Quickbird y vistas de Google Earth© confirman la ausencia de depósitos atribuibles a erupciones explosivas de mayor envergadura.

En esas condiciones, las erupciones máficas mayores serían un escenario extremo y, en consecuencia, no se cumplen las condiciones para la generación de grandes columnas eruptivas que simultáneamente emplacen volúmenes importantes de material piroclástico en la zona distal o la ocurrencia de eventos de colapso de la columna eruptiva que generaran subsecuentemente flujos piroclásticos de envergadura.

En síntesis, los procesos más relevantes serían la ocurrencia de flujos lávicos (con impacto restringido a la zona proximal) y lahares asociados (con impacto en la zona proximal a distal). Sobre la base de ese escenario, el *buffer* externo de 50 km permite identificar 22 subcuencas de las cuales 6 son seleccionadas con el *buffer* interno de 10 km que identifica aquellos valles más propensos a recibir los productos eruptivos.

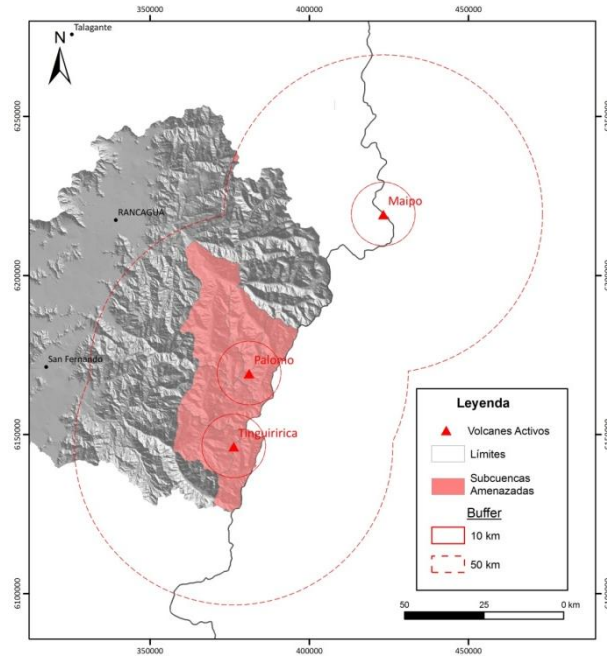


Figura 23. Mapa de ubicación de las subcuencas amenazadas por **peligro de lahares** en el área de estudio con indicación de los *buffers* utilizados en la evaluación. Nótese que ninguna de las subcuencas asociadas al volcán Maipo se extiende a la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. Fuente: Elaboración propia a partir de datos públicos. Ubicación de volcanes modificada de González-Ferrán (1995).

El criterio de la 'Línea de Energía' (razones H/L de 0,25, 0,18 y 0,1, respectivamente) permite identificar zonas de Alto, Moderado y Bajo peligro cuyo significado es como sigue:

**Alto Peligro.**

Zona susceptible de ser afectada por escurrimiento de lavas, proyección de fragmentos balísticos, lahares y flujos piroclásticos de menor envergadura; relacionados con erupciones de magnitud baja a moderada cuya probabilidad de ocurrencia relativa puede ser mayor.

**Moderado Peligro.**

Zona susceptible de ser afectada por lahares, flujos piroclásticos y avalanchas volcánicas de mayor envergadura; relacionados con erupciones de magnitud media cuya probabilidad de ocurrencia relativa es menor.

### **Bajo Peligro.**

Zona susceptible de ser afectada por lahares, flujos piroclásticos y avalanchas volcánicas de envergadura excepcionalmente alta; relacionados con erupciones de magnitud mayor cuya probabilidad de ocurrencia relativa es muy baja.

Por otra parte, la zona susceptible de ser afectada por caída de piroclastos con acumulación mayor a 1 cm, excluyendo aquellos de proyección balística cuya acumulación es menor y ocurre generalmente en una radio interno de 3 km, es identificada como una envolvente con eje de dispersión dirigido al sureste.

La zonificación integrada indica que la zona proximal más susceptible de ser afectada por lavas y lahares (Alto Peligro) alcanza ca. 175 km<sup>2</sup>. La zona propensa al impacto de lavas y lahares de mayor envergadura, en menor medida flujos piroclásticos, alcanza 457 km<sup>2</sup> (Moderado Peligro) mientras la zona susceptible de ser afectada solo en eventos mayores tendría una superficie de ca. 1458 km<sup>2</sup> (Bajo Peligro).

El detalle del análisis para cada uno de los volcanes se detalla en la figura escala 1:250.00 para cada uno de los centros volcánicos en estudio. Se incluye el correspondiente esquema para el volcán Maipo con el objeto de mostrar que el análisis no indica zonas potencialmente afectadas en la región.



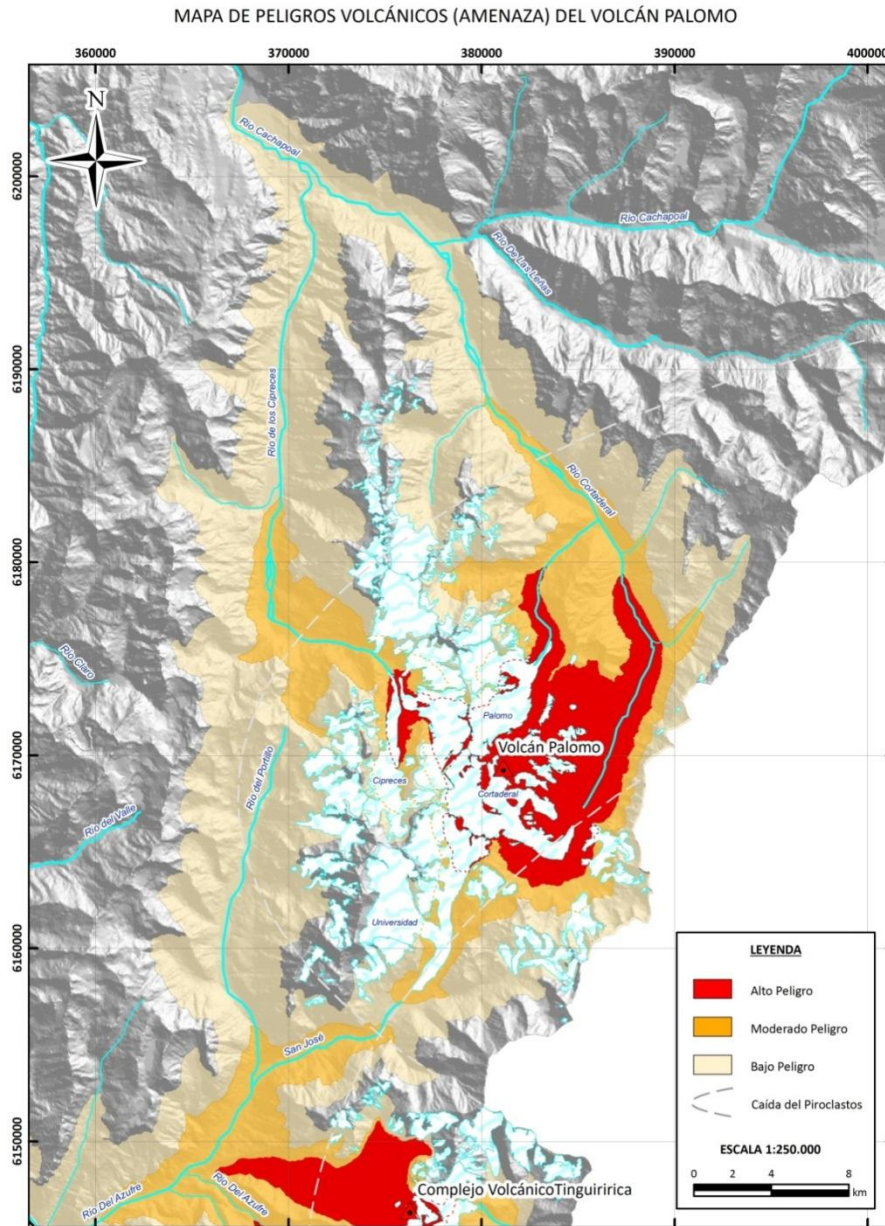


Figura 24. Mapa de Peligros del volcán Palomo escala 1:250.000 en el que se incluye la cobertura glaciar. Las zonas de peligros bajo la cobertura glaciar aparecen delimitadas por una línea punteada.





MAPA DE PELIGROS VOLCÁNICOS (AMENAZA) DEL VOLCÁN MAIPO

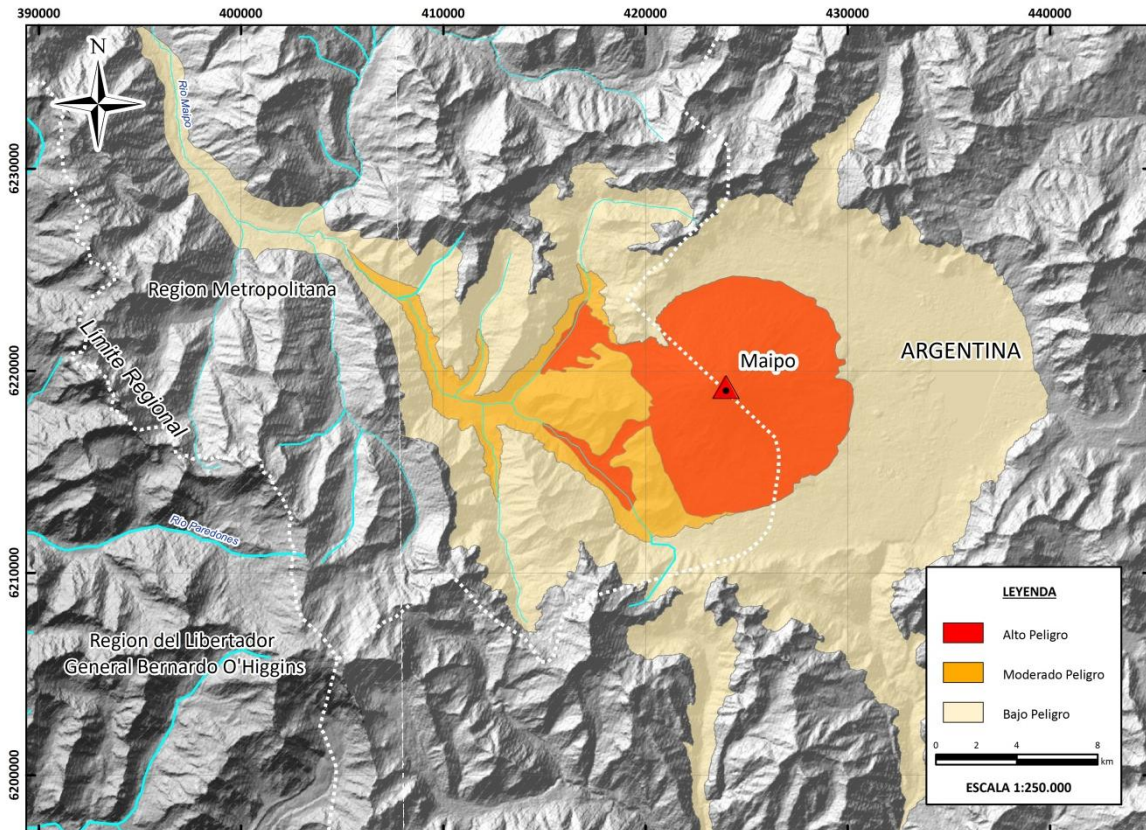


Figura 26. Mapa de Peligros Volcánicos del Volcán Maipo escala 1:250.000 en el que se incluye la cobertura glaciar. Las zonas de peligros bajo la cobertura glaciar aparecen delimitadas por una línea punteada.

#### 4.7.2 Análisis de Sensibilidad.

El uso de modelos numéricos o fórmulas de cálculo, aunque regulares en este tipo de problemas, implican una serie de supuestos que obligan a calibrar los resultados para un mejor ajuste. En efecto, una forma de validar los resultados es el levantamiento de puntos de control en terreno en los cuales se verifica la existencia de depósitos característicos y se comprueba el alcance máximo pronosticado. En ausencia de esa información, una alternativa es confrontar los resultados con datos estadísticos representativos de estos escenarios.

En este caso, se ha analizado el volumen y el máximo alcance (runout) de varios depósitos laháricos bien descritos en la literatura. En la figura 5.4 se presentan algunos casos históricos correspondientes a lahares generados en volcanes cuyas cubiertas glaciares son comparables a aquellas de los volcanes Palomo y Tinguiririca.

Puede observarse que los lahares de los volcanes Villarrica y Calbuco ocurridos en 1961 y 1971 exhiben un alcance máximo similar a aquel propuesto como límite de la zona de Moderado Peligro (16-20 km). En tanto, el límite externo de la zona de Bajo Peligro presenta se encuentra a una distancia considerablemente mayor (33-38 km) aunque todavía dentro del rango posible de algunos eventos históricos como atestigua el caso del Nevado del Ruiz en Colombia el año 1985. Un límite máximo, alejado de los casos históricos observados en diferentes regiones del mundo es el lahar del Mount Rainier en Estados Unidos, fechado mediante radiocarbono en ca. 5 mil años (Iversonet *al.*, 1998).

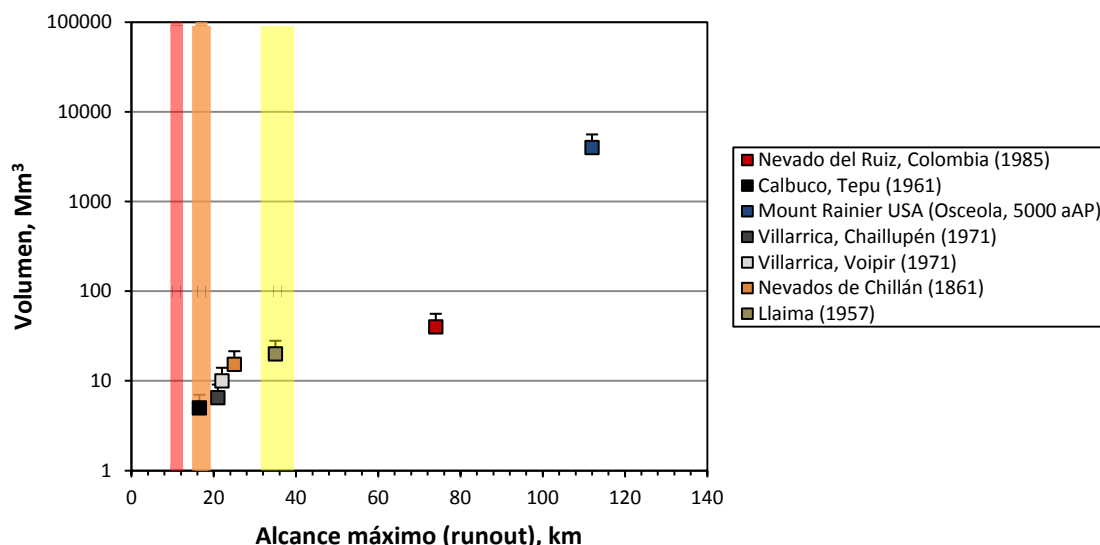


Figura 27. Gráfico de alcance máximo (runout) y volumen para lahares bien caracterizados que permiten un análisis de sensibilidad en ausencia de datos de campo. Las barras verticales indican el rango de alcance para los procesos que definen las zonas de alto (rojo), moderado (naranja) y bajo (amarillo) peligro volcánico. Barras de error indican hasta un 40% de volumen adicional al momento del emplazamiento. Nótese que la zona de Alto Peligro excede el alcance de los lahares históricos en Chile y probablemente sobreestima ese escenario. Datos tomados principalmente de Iversonet *al.*, 1998; Castruccioet *al.*, 2010 y Ramos, 2012.

#### 4.7.3 Vulnerabilidad.

La zona de Alto Peligro (radio de ca. 12 km) alcanza una superficie de ca. 175 km<sup>2</sup> y corresponde al 1,06% de la superficie regional. La zona de Moderado Peligro (radio de ca. 20 km) alcanza una superficie de 457 km<sup>2</sup> y constituye el 2,78% de la superficie regional. A su vez, la zona de Bajo Peligro (radio de ca. 40 km) presenta una superficie de 1458 km<sup>2</sup> y corresponde al 8,89% de la superficie regional.

Las comunas potencialmente afectadas son las de Machalí y San Fernando; las restantes presentan nula exposición al impacto directo de las erupciones.

En términos comparativos, la región presenta menor exposición frente al peligro volcánico al confrontarse con el panorama nacional por cuanto solo un 4% de su superficie está expuesta al impacto directo de las erupciones volcánicas mientras en el territorio nacional esa exposición llega incluso a un 17% de su superficie (Lara *et al.*, 2011).

En términos de la población, la exposición en la región es también reducida. En efecto, no existe registro de población en un radio de 10 km en torno a los volcanes activos. Para situar este dato en un contexto global, el registro para Centroamérica indica que alrededor de 2,7 millones de personas viven a esa distancia de los volcanes activos (Ewert y Hampel, 2004). A su vez, en la zona de impacto indirecto o Bajo Peligro, sólo 18 personas aparecen reportadas en el Censo de 2002 aunque las entradas no incluyen la localidad de Termas del Flaco y su población flotante.

Por otra parte, no se reconoce infraestructura relevante en la zona de Alto Peligro. En la zona de Moderado Peligro se encuentra la central San Andrés (40 MW) mientras en aquella de Bajo Peligro se ubican las centrales La Higuera (155 MW) y El Paso (40 MW). Un resumen de los aspectos que caracterizan la vulnerabilidad frente al peligro volcánico se encuentran en la Tabla 16 siguiente:

Volcán	Código GVN	UTM N	UTM E	Altitud (msnm)	No. Habs. Zona Bajo Peligro	Infraestructura energética amenazada	Línea de Transmisión eléctrica (km)	Red vial expuesta (km)	Status monitoreo instrumental
Palomo	1507-022	6169367,55	381060,21	4850	0	Chacayes 1 y 2	6 (aproximado)	0	NO
Tinguiririca	1507-03	6146440,64	376223,50	4280	18	La Higuera, San Andrés, El Paso	17,71 (45 adicionales por empalme con San Andrés y El Paso)	39,31 km	NO
Fuente: este estudio; datos de infraestructura provistos por el Gobierno Regional									
Nota 1: Status del monitoreo instrumental según SERNAGEOMIN ( <a href="http://www.sernageomin.cl">www.sernageomin.cl</a> ) a diciembre 2012									
Nota 2: Población amenazada según Censo 2002 no incluye residentes de Termas del Flaco ni población flotante									

Tabla 16. Vulnerabilidad asociada a volcanes de la Región de O´Higgins. Fuente: Este estudio, modificado de *Lara et al., 2011*).

#### 4.7.4 Probabilidad de Ocurrencia de Erupciones Futuras.

El análisis desplegado hasta ahora es determinístico, es decir, es independiente de la probabilidad de ocurrencia de los eventos que generarían los efectos pronosticados. Como una aproximación muy básica a la probabilidad concreta de que tales situaciones se produzcan, y con ellas los efectos asociados, se incluye aquí algunas consideraciones basadas en datos globales y regionales.

En primer lugar, del registro global se sabe que existe una relación entre la magnitud y la frecuencia que sigue la misma forma de la relación de Gutenberg-Richter bien conocida para los sismos (Simkin y Siebert, 2005). En otras palabras, las erupciones de menor magnitud son más frecuentes que las de mayor envergadura. En efecto, erupciones estrombolianas de IEV=3 similares a las esperadas en los volcanes de la región ocurren a razón de 3 cada año en el mundo mientras aquellas algo mayores de IEV=4 tienen frecuencia un orden de magnitud menor (Simkin y Siebert, 2005).

Por otra parte, datos más específicos de los Andes del Sur analizados por Dzierma y Wehrmann (2012), sugieren que existe un 20% de probabilidad para la ocurrencia de una erupción de  $IEV \geq 3$  el año siguiente en algún volcán del segmento Tupungatito-Hudson; 50% en los próximos 3-4 años y 90% en los próximos 9-11. Sin embargo, es más difícil determinar cuáles son los volcanes más susceptibles, particularmente si



entre ellos existen algunos como Palomo y Complejo Volcánico Tinguiririca cuyo registro histórico es muy reducido y no permite un análisis estadístico.

#### 4.8 Conclusiones.

Los resultados expuestos permiten sostener que la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins está sólo moderadamente expuesta a los peligros volcánicos. En efecto, los volcanes de la región resultan más propensos a iniciar erupciones de baja magnitud y excepcionalmente de magnitud moderada, con baja probabilidad de escenarios asociados a erupciones mayores. En esas condiciones, los peligros declarados se concentran en la zona proximal (radio de ca. 12 km) y consisten básicamente en el escurrimiento de lavas, dispersión de piroclastos balísticos en el radio interno de 3-5 km y generación de lahares. Esta zona alcanza una superficie de ca. 175 km<sup>2</sup> y corresponde sólo al 1,06% de la superficie regional. Los lahares podrían alcanzar distancias mayores (radio de 15-20 km) dependiendo de factores favorables en el desarrollo de la erupción tales como alta tasa de emisión y volumen de hielo/nieve en el área de surgencia. Se estima que lahares de mayor volumen capaces de superar los 20 km desde la fuente presentan baja probabilidad de ocurrencia por comparación con el registro eruptivo de volcanes en los Andes del Sur y otras regiones del mundo.

Estas características configuran la zona de Moderado Peligro cuya superficie alcanza los 457 km<sup>2</sup> y constituye el 2,78% de la superficie regional. Asimismo, el estilo eruptivo dominante en los volcanes Palomo y Complejo Volcánico Tinguiririca no favorece la ocurrencia de eventos explosivos de mayor magnitud y con eso se excluye la posibilidad de generación de grandes flujos piroclásticos que superen el radio de 20 km. En consecuencia, la zona de Bajo Peligro representa un área susceptible de ser afectada únicamente con eventos que sobrepasen el umbral más probable para este tipo de volcanes y por lo tanto existiría una baja probabilidad relativa de efectos directos. Esta zona presenta una superficie de 1458 km<sup>2</sup> y corresponde al 8,89% de la

superficie regional. Efectos secundarios tales como crecidas de río e inundaciones y aumento de la carga de sedimentos son efectos previsibles en esa zona.

La exposición o vulnerabilidad frente al peligro volcánico es relativamente baja en la región si se la compara con otras regiones del país como la Región del Biobío o la Región de la Araucanía. En efecto, no se reconoce infraestructura relevante en la zona de Alto Peligro. Por otra parte, solo la central San Andrés (40 MW) se encontraría en la zona de Moderado Peligro mientras las centrales La Higuera (155 MW) y El Paso (40 MW) lo harían en la zona de Bajo Peligro. Por último, la población marginalmente amenazada se encuentra en la zona de Bajo Peligro y correspondería a 18 habitantes según el Censo de 2002, cifra a la que se sumaría la población flotante de Termas del Flaco.

#### **4.9 Recomendaciones.**

La zona proximal de Alto Peligro corresponde a la zona más susceptible de ser afectada por procesos volcánicos. En ese dominio se recomienda excluir el desarrollo de infraestructura mayor y condicionar el desarrollo de proyectos de inversión (e.g., iniciativas turísticas) a la realización de evaluaciones del peligro volcánico escalas de mayor detalle.

La zona proximal de Moderado Peligro corresponde a una zona que podría ser afectada por procesos de mayor envergadura pero menor frecuencia, mayormente lahares. En ese dominio se recomienda condicionar el desarrollo de infraestructura mayor y el desarrollo de proyectos de inversión a la realización de evaluaciones del peligro volcánico escalas de mayor detalle que incluyan el diseño de obras de mitigación frente a lahares (aluviones) y crecidas. Los asentamientos humanos o faenas de carácter temporal deberían contar con planes de emergencia.

La zona media-distal de Bajo Peligro corresponde a una zona que sólo podría ser afectada por procesos de envergadura excepcional y por lo tanto baja probabilidad de ocurrencia. Efectos secundarios asociados con procesos que afecten la zona proximal

podrían expresarse en ella. En ese dominio se recomienda condicionar el desarrollo de infraestructura mayor y el desarrollo de proyectos de inversión a la realización de evaluaciones del peligro volcánico escalas de mayor detalle que incluyan el diseño de obras de mitigación frente a crecidas y aumentos de la carga sedimentaria en los cursos fluviales. Los asentamientos humanos de carácter permanente deberían contar con planes de emergencia y vías de evacuación expeditas en caso de crisis que afecten el curso superior del valle respectivo.

A continuación, en la tabla 17 se presenta una Matriz de Riesgos y sus respectivas recomendaciones para cada uno de los niveles de peligro definidos:

Peligro	Vulnerabilidad	Riesgo	Observaciones	Recomendaciones
Alto	Baja	Bajo	Zona susceptible de ser afectada mayoritariamente por lavas y lahares y proyecciones balísticas asociadas a erupciones menores de mayor recurrencia	Restricciones a la infraestructura crítica; actividades temporales controladas
Medio	Baja	Bajo	Zona susceptible de ser afectada por lavas y especialmente lahares asociados a erupciones de mayor magnitud y baja recurrencia	Condiciones a la infraestructura crítica y planes de contingencia para faenas
Bajo	Baja	Bajo	Zona susceptible de ser afectada por lahares de volumen excepcionalmente alto y muy baja recurrencia o especialmente efectos secundarios asociados con procesos del área proximal	Condiciones a la infraestructura crítica y planes de emergencia para localidades pobladas

Fuente: Elaboración propia

Nota: El Riesgo es calificado cualitativamente como el producto de Peligro y Vulnerabilidad

Tabla 17. Matriz de Riesgos y Recomendaciones.

#### 4.10 Bibliografía

- Amigo, A.; Bertin, D.; Orozco, G. 2012. Nueva metodología para la evaluación regional de peligros volcánicos: ejemplo de la zona norte de Chile. In Congreso Geológico de Chile No. 23, Antofagasta.
- Armijo, R., Rauld, R., Thiele, R., Vargas, G., Campos, J., Lacassin, R., Kausel, E. 2010. The West Andean Thrust, the San Ramón Fault, and the seismic hazard for Santiago, Chile, *Tectonics*, 29, TC2007, doi:10.1029/2008TC002427.
- Arcos, J. 1987. Geología del Cuadrángulo Termas del Flaco Provincia de Colchagua. VI Región, Chile.
- Arcos, R., Charrier, R., Munizaga, F. 1988. Volcanitas cuaternarias en la hoya superior del río Tinguiririca (34° 40' LS – 70° 21' LW): Características geológicas antecedentes geoquímicos y geocronológicos. In Congreso Geológico Chileno No. 5, vol 3, p. 1245-1260. Santiago.
- Blong, R.J. 1984. *Volcanic Hazards, a source book on the effects of eruptions*. Academic Press, Sydney, Australia, 424 p.
- Bruggen J, 1950. *Fundamentals of the Geology of Chile*. Santiago: Editado por el Instituto Geográfico Militar, p. 1-374.
- Castruccio, A.; Clavero, J.; Rivera, A. 2010. Comparative study of lahars generated by the 1961 and 1971 eruptions of Calbuco and Villarrica volcanoes, Southern Andes of Chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 190 (3-4): 297-311.
- Cembrano, J.; Lara, L.E. 2009. The link between volcanism and tectonics in the southern volcanic zone of the Chilean Andes: A review. *Tectonophysics* 471 (1-2): 96-113.
- Charrier, R.; Wyss, A.; Flynn, J.; Swisher III, C.C.; Spichiger, S.; Zapatta, F. 1994. Nuevos antecedentes estratigráficos y estructurales para las formaciones Coya-Machalí y Abanico, entre los 33° 50' y 35° S, Cordillera Principal Chilena. In Congreso Geológico Chileno, No. 7, Actas, Vol. 2, p. 1316-1319. Concepción.
- Charrier R., 1973, Geología de las Provincias de O`Higgins y Colchagua. *Inst. Invest. Recursos Naturales*, 7, 69.

- Charrier, R., 1979. Los volcanes Andrés y Don Casimiro, dos centros descubiertos en la Cordillera de los Andes entre 34° y 34° 45'S. Revista Geológica de Chile, Santiago, N° 8, p. 79-85.
- Charrier, R. 1981. Geologie der chilenischen Hauptkordillere zwischen 34° und 34° 30' südlicher Breite und ihre tektonische, magmatische und paläogeographische Entwicklung. Berliner Geowissenschaftliche Abhandlungen, Reihe A, 36, 370 p.
- Charrier, R. 1983. Informe geológico de la Hoja El Teniente, escala 1:250.000. Convenio Departamento de Geología, Universidad de Chile - SERNAGEOMIN, Santiago, 1 mapa.
- Davison, J. 1971. Geología del área de las Nacientes del Teno, Provincia de Curicó, Chile. Memoria de Título, Departamento de Geología, Universidad de Chile, 160 pp. Santiago.
- Dzierma, I.; Wehrmann, H. 2012. On the likelihood of future eruptions in the Chilean Southern Volcanic Zone: interpreting the past century's eruption record based on statistical analyses. Andean Geology 39 (3): 380-393.
- Ewert, J.W.; Harpel, C.J. 2004. In Harm's Way: Population and Volcanic Risk. Geotimes.
- Ewert, J.; Guffanti, M.; Murray, T. 2005. An Assessment of Volcanic Threat and Monitoring Capabilities in the United States: Framework for a National Volcanic Early Warning System, NVEWS. US Geological Survey, Open-File Report 1164: 1-62.
- GFDRR. 2011. Volcano Hazard and Exposure in GFDRR Priority Countries and Risk Mitigation Measures. 20100806-00-1-R.
- Godoy, E. Lara, L., Ugalde, I. 1994. Derrumbes de cerros holocenos en los Andes centrales de Chile. Actas 7° Congreso Geológico Chileno, Vol. 1, p. 310-314. Concepción.
- González-Ferrán, O. 1995. Volcanes de Chile. Instituto Geográfico Militar, Santiago, 640 p.
- Hantke G, 1962. Übersicht über die Vulkanische Tätigkeit 1957-1959. Bull Volc, 24: 321-348.

- Harris, A.J.; Rowland, S. 2001. FLOWGO: a kinematic thermo-rheological model for lava flowing in a channel. *Bulletin of Volcanology* 63 (1): 20-44.
- Iverson, R.M., Schilling, S.P.; Vallance, J.W. 1998. Objective delineation of lahar-inundation hazard zones. *GSA Bulletin* 110 (8): 972-984.
- Kanamitsu, M.; Ebisuzaki, W.; Woollen, J.; Yang, S.; Hnilo, J.J.; Fiorino, M., Potter, G.L. 2002. NCEP-DOE AMIP-IIREANALYSIS (R-2).
- Lara, L.E.; Orozco, G.; Amigo, A.; Silva, C. 2011. Peligros Volcánicos de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental, No., p., 1 mapa escala 1:2.000.000, Santiago.
- Malin, S.; Sheridan, S. 1982. Computed-assisted mapping of pyroclastic surges. *Science* No. 217: 637-639.
- Mastin, L.G.; Guffanti, M.; Servranckx, R.; Webley, P.; Barsotti, S.; Dean, K.; Durant, A.; Ewert, J.W.; Neri, A.; Rose, W.I.; Schneider, D.; Siebert, L.; Stunder, B.; Swanson, G.; Tupper, A.; Volentik, A.; Waythomas, C.F. 2010. A multidisciplinary effort to assign realistic source parameter models of volcanic ash-cloud transport and dispersion during eruptions, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, doi:10.1016/j.jvolgeores.2009.01.008.
- Newhall, C.; Self, S. 1982. The Volcanic Explosivity Index (VEI): An estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *Journal of Geophysical Research* No. 87, p. 1231-1238.
- Orozco, G.; Lara, L.E.; Amigo, A.; Silva, C.; Bertin, D. 2012. Evaluación de peligros volcánicos durante períodos de crisis: ejemplo del Cordón Caulle 2011-2012. In Congreso Geológico de Chile No. 23, Antofagasta.
- Ramos, I. 2012. Estudio de la dinámica de los lahares recientes del flanco oeste del complejo volcánico Nevados de Chillán (36°50'S), Andes del Sur. Memoria de Título (inédito), Universidad de Chile.
- Sapper K, 1917. *Katalog der Geschichtlichen Vulkanausbrüche*. Strasbourg: Karl J Trubner, 358 p.
- Sapper K, 1927. *Vulkankunde*. Stuttgart: J Engelhorn's Nachf, 424 p.
- Schilling, S. P., 1998, LAHARZ: GIS programs for automated delineation of lahar hazard zones, U.S. Geological Survey Open-file Report.



- SERNAGEOMIN. 2002. Mapa Geológico de Chile escala 1:1.000.000. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile.
- Siebert, L.; Simkin, T.; Kimberly, P., 2010, *Volcanoes of the World*, 3rd ed. Berkeley: University of California Press, 568 p.
- Simkin, T.; Siebert, L. 2005. Earth's volcanoes and eruptions: an overview. In Encyclopedia of Volcanoes.
- Sruoga, P.; Llambías, E.J.; Fauqué, L.; Schonwandt, D.; Repold, D.G. 2005. Volcanological and geochemical evolution of the Diamante Caldera–Maipo volcano complex in the southern Andes of Argentina (34°10'S). *Journal of South American EarthSciences* 19 (4): 399-414.

## 5. AMENAZA SÍSMICA.

### 5.1 INTRODUCCIÓN.

Chile se encuentra ubicado en la zona de subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana (entre los 18° y 47°S). Dicha convergencia tectónica resulta en una de las regiones con mayor actividad sísmica del planeta. En la costa de Chile se han registrado los terremotos de mayor magnitud ( $M_w=9.5$ ) a nivel mundial medidos instrumentalmente (Kanamori & Cipar 1974). Como es de esperar, las pérdidas humanas y materiales relacionadas con sismos y otros procesos asociados (tsunamis, deslizamientos etc.) han sido cuantiosas.

Existen numerosos ejemplos de sismos que han provocado significativos daños socioeconómicos en la región central de Chile. El 3 de marzo de 1985 un sismo de  $M_w=8.0$  con hipocentro a 17 km de profundidad, y epicentro cercano a Laguna Verde en la Región de Valparaíso, dejó 177 víctimas fatales y más de mil millones de dólares en pérdidas (El Mercurio 2010). Eventos de similares características tendrían una recurrencia de  $83 \pm 9$  ( $X \pm SD$ ) años en la zona (Compte et al., 1986). El sismo de mayor magnitud registrado en las últimas tres décadas en Chile central ocurrió en febrero de 2010 cerca de Cobquecura, en la Región del Maule. Este evento tuvo su epicentro en el mar y registró una magnitud  $M_w=8.8$ . Se registraron cuantiosos daños a consecuencia directa de este terremoto y el posterior tsunami.

La Región del Libertador General Bernardo O'Higgins ha sido afectada tanto por sismos con epicentros lejanos como por sismos con epicentros en su territorio. El sismo de mayor magnitud en ésta región ocurrió cerca del Embalse Rapel, en marzo de 1985, y tuvo una magnitud  $M_s=7.5$ . Numerosos sismos mayores a 5 grados Richter se registraron el año 2010, probablemente asociados al gran terremoto ocurrido en febrero de ese año en la costa de la Región del Maule.

En este capítulo se analiza la amenaza sísmica en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins en base a los registros sísmicos desde la década de los setenta, con el fin de identificar los sistemas estratégicos (asentamientos poblados, infraestructura, etc. en zonas de riesgo).

### **5.1.1 Objetivo.**

El informe tiene como objetivo evaluar la amenaza sísmica en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins en base al análisis de registros sísmicos históricos e identificar la población e infraestructura en zonas de riesgo.

## **5.2 Metodología Utilizada.**

Para la construcción de una cobertura única que represente y categorice de manera fidedigna áreas de Amenaza Sísmica en la zona de estudio, se consideraron tres etapas: 1. Elaboración de un Mapa de Zonas de Demanda Sísmica; 2. Elaboración de Mapa de Recurrencia Sísmica y 3. Combinación Lineal Ponderada de Coberturas. A continuación se detalla la metodología utilizada para cada una de ellas:

### **5.2.1 Mapa de Zonas de Demanda Sísmica.**

Para la construcción de ésta cobertura se construyó un análisis probabilístico de peligro sísmico en la zona de estudio (sensu Leyton, *et al.*). Para ello, en primer lugar se deben definir las principales fuentes sismogénicas presentes en el lugar, al igual que la caracterización de cada una de ellas, que se hace mediante un análisis de la sismicidad presente en la zona de estudio. Parte importante de la descripción de las fuentes sismogénicas, es la caracterización de su productividad sísmica mediante la ley de Gutenberg -Richter (Gutenberg & Richter, 1944). Por otra parte, se debe definir, en base a la sismicidad histórica, la magnitud máxima que alcanza cada fuente sismogénica, con su respectiva función de atenuación (conocidas como leyes de atenuación), la cual puede ser estimada a partir del estudio de los registros de terremotos en la zona de interés, en donde se pueden seleccionar aquellos registros en donde es posible ligar una cierta magnitud con una aceleración

horizontal máxima a observar, considerando la pérdida de energía con respecto a la distancia.

Utilizando estos antecedentes se procedió a la estimación del peligro sísmico mediante el uso de una técnica eminentemente probabilística. Ella se basa en el trabajo de Cornell (1968), mediante las aproximaciones hechas por Algermissen & Perkins (1976) y Algermissen *et al.* (1982), al igual que Anderson & Trifunac (1978). En general, las fuentes sismogénicas fueron consideradas homogéneas, teniendo en cada una de sus partes las mismas propiedades usualmente utilizadas en éste tipo de trabajos (Barrientos, 1980; Algermissen *et al.*, 1982; Leyton *et a.*, 2009, 2010).

#### **5.2.1.1 Determinación de las Fuentes Sísmicas.**

Si bien en la zona de estudio existen cuatro fuentes generadoras de terremotos, sólo tres de ellas son relevantes en términos de la estimación del peligro sísmico. Cada tipo de fuente sismogénica fue dividida en subfuentes puntuales, permitiendo la descripción de superficies complejas. La descripción de las subfuentes de los dos primeros tipos se realizó sobre la base de la localización del borde superior de la placa de Nazca, obtenida de la inversión de modelos de velocidad en 3D (Gudmundsson & Sambridge, 1998). Se consideró que las propiedades de cada tipo eran constantes en toda la superficie, teniendo valores homogéneos de productividad sísmica y magnitud máxima. Para todos los efectos del presente estudio, se entiende por productividad sísmica a la capacidad que tiene una determinada zona para generar terremotos midiendo mediante el parámetro "a" de la ley de Gutenberg-Richter.

Por otro lado, la fuente cortical fue descrita sobre la base de la sismicidad reportada, asumiendo que ella seguiría ocurriendo en aquellos lugares donde se ha registrado, supuesto usual en este tipo de estudios (Algermissen & Perkins, 1976; Cao *et al.*, 1996). Dado que este tipo de fuente es producida por la presencia de fallas sísmicamente activas, su distribución no puede ser homogénea, debiendo concentrarse en ciertas zonas. Así, siguiendo la metodología definida por Lapajne *et al* 2003, se asigna una productividad sísmica en cada subfuente proporcional a la sismicidad

registrada, considerando un filtro suavizante Gaussiano que da cuenta de posibles errores en la localización. Una metodología similar fue definida para determinar la magnitud máxima de cada subfuente: se seleccionó el evento de mayor magnitud en las cercanías de cada subfuente y luego este valor fue aumentado, limitándose por la magnitud máxima de la fuente cortical ( $M_{max}=7,5$ ).

Sobre la base del análisis de las fuentes sismogénicas en el área de estudio, se concluye que es necesario adecuar las leyes de Gutenberg & Richter (1944), así como también las ecuaciones de atenuación. Finalmente, sobre la base de estos parámetros, el autor reconoce tres categorías de riesgo por sismos (Figura 27).

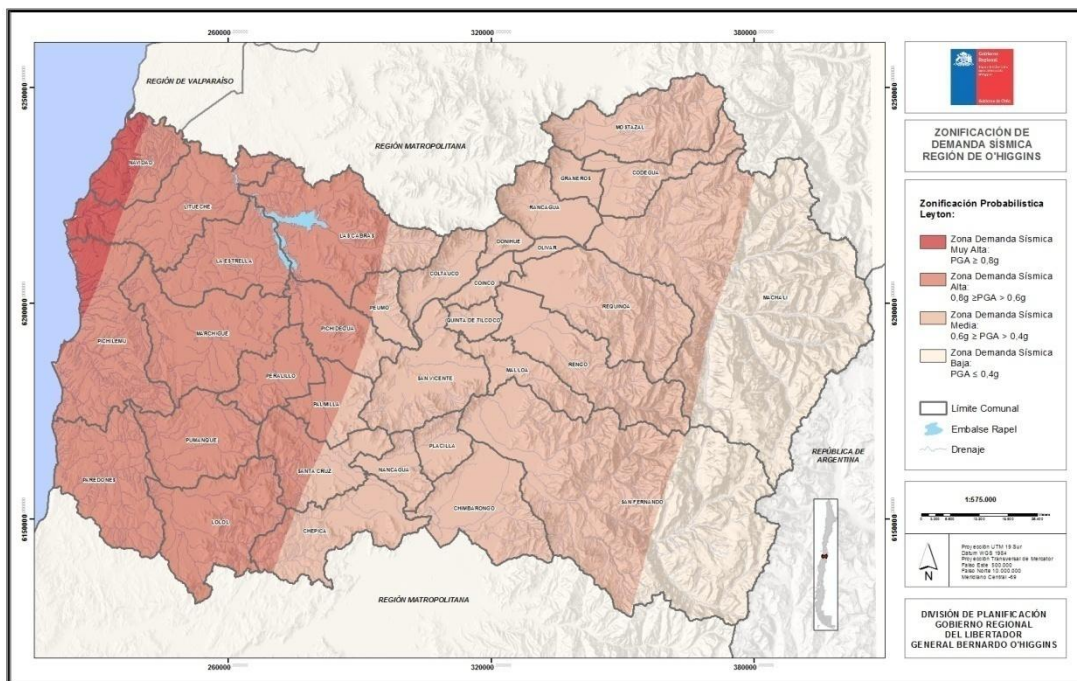


Figura 28. Mapa de Peligro Sísmico Probabilístico. Fuente: Leyton et al., 2010.

### 5.2.2 Mapa de Recurrencia Sísmica.

Para la construcción de esta cobertura se descargaron los registros históricos de actividad sísmica en una escena comprendida entre los 30° a 37° S y 69,6° a 74° W a partir del catálogo NEIC (National Earthquake Information Center) de la United States



Geological Survey (USGS). La selección de esta porción de territorio es la misma utilizada por Leyton *et al* (2010), ya que incorpora las principales fuentes sismogénicas descritas por el autor para la zona central de Chile (interplaca tipo "thrust, interplaca de profundidad intermedia y corticales).

Los registros corresponden al intervalo temporal comprendido entre enero de 1973 hasta noviembre de 2012, considerando toda actividad sísmica registrada superior a 1 grado Richter. Cabe destacar que el sismo de mayor magnitud que afectó a la zona de estudio en el intervalo temporal especificado, corresponde al terremoto del 27 de febrero de 2010, el cual fue de 8,8 grados en la escala de Richter.

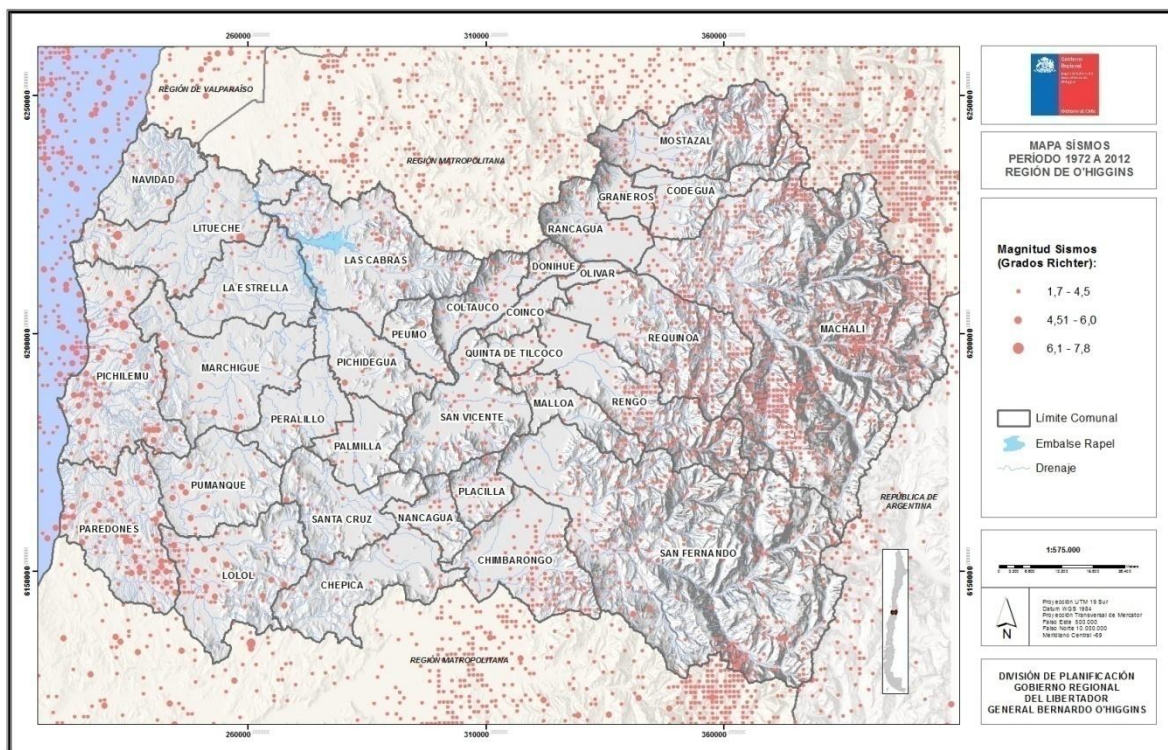


Figura 29. Mapa de ubicación de epicentros de sismos ocurridos en la zona central de Chile desde 1973 al 2012. Fuente NEIC - USGS



En total se obtuvieron 27.203 registros la gran mayoría fuera de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, ya que la ubicación de cada registro corresponde a los epicentros (Figura 28.), sin embargo sus efectos pueden ser evidenciados a varios kilómetros a la redonda desde el punto de liberación de energía, además al incluir mayor cantidad de registros mejora la confianza estadística de modelo espacial realizado.

Para la determinación de potenciales patrones de distribución para sismos en la región, se procedió al desarrollo de modelos geoestadísticos que toman en cuenta la autocorrelación espacial de los datos territorializados, estos modelos en conjunto son conocidos como Kigreado, los cuales son métodos de interpolación espacial que dependen de la noción de autocorrelación como una función de la distancia ( $h$ ). La información sobre las ubicaciones espaciales permite computar distancias entre las observaciones y el modelo de autocorrelación como una función de la distancia.

Los modelos de Kigreado asumen que los términos expresados en la fórmula matemática  $Z(s) = \mu(s) + \varepsilon(s)$ , donde  $Z(s)$  es la variable de interés a una ubicación "s", descompuesto dentro de un tendencia determinística  $\mu(s)$ , y un error aleatorio autocorrelacionado  $\varepsilon(s)$ . Algunos supuestos son hechos a partir de  $\varepsilon(s)$ : se espera que el promedio sea 0 y la autocorrelación entre  $\varepsilon(s)$  y  $\varepsilon(s + h)$  no depende de la ubicación actual de  $s$ , sino sólo de la distancia  $h$ . La tendencia determinística  $\mu$  puede ser una constante desconocida (Kigreado Ordinario), una constante conocida (promedio de los pesos de los valores observados (Krigreado Simple), o una tendencia de superficie polinomial (Kigreado Universal).

Los modelos de Kigreado usan variogramas, estos son formas matemáticas que expresan autocorrelación como una función de la distancia. Tanto la exploración de las autocorrelaciones espaciales a partir del semivariograma como los modelos de Kigreado fueron desarrollados con el módulo Geostatistical Analyst del software ArcGis 10.

Específicamente, se investigó si existe autocorrelación espacial en la variable magnitud medida en grados Richter obtenido a partir del catálogo NEIC, para ello los datos fueron sometidos a un análisis exploratorio, en donde el modelo teórico de ajuste del semivariograma experimental más adecuado resultó ser el estable y, dado que se desconoce el parámetro de tendencia determinística  $\mu(s)$  se optó por un Kigreado Ordinario.

Los resultados del modelo geoestadístico, demuestran que la ubicación y magnitud de eventos sísmicos en la zona de estudio no responden a una distribución azarosa en el espacio, sino que presenta estructuración espacial sobre la base de la variable analizada. Ello implica, que es posible la generación de coberturas con altos niveles de confianza estadística, y por lo tanto es susceptible de realizar un mapa que represente zonas con mayor o menor probabilidad de ocurrencia de actividad sísmica de una magnitud determinada (Figura 29).

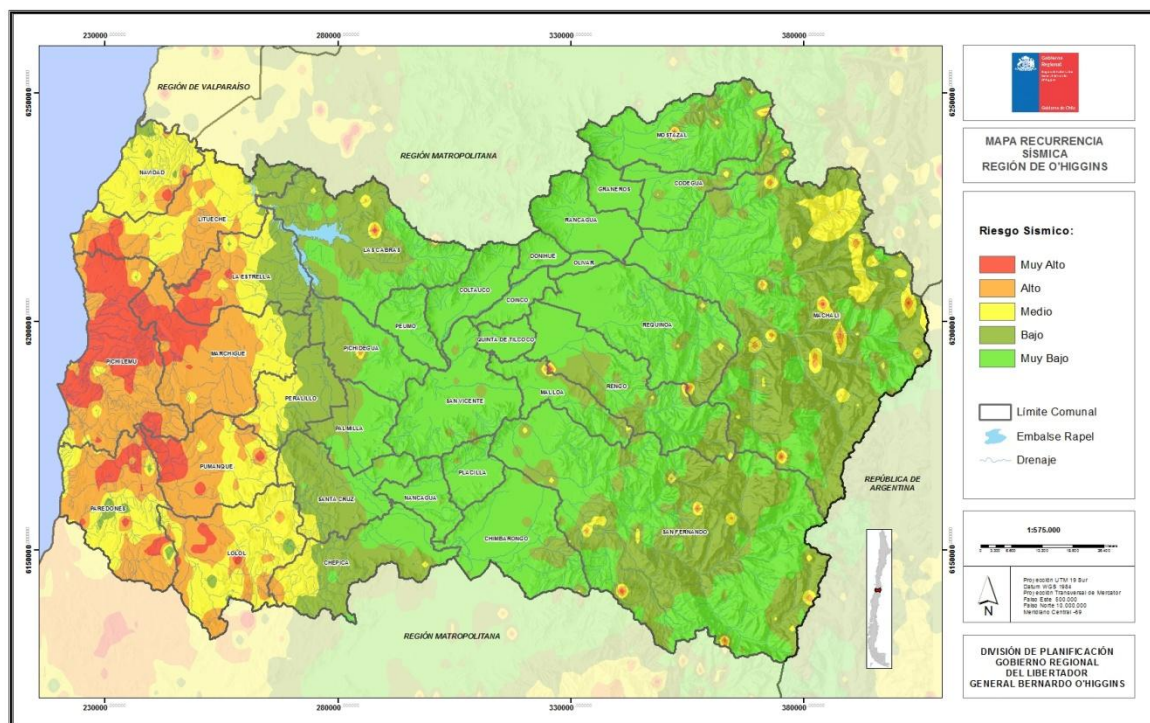


Figura 30. Mapa de Epicentros de Sismos Históricos. Fuente: Gobierno Regional de O´Higgins, 2012.

### 5.2.3 Combinación Ponderada de Coberturas.

La ponderación lineal es un método que permite abordar situaciones de incertidumbre o con pocos niveles de información. En este método, se construye una función de valor para cada una de las alternativas que puede resultar dependiente y manipulable en la asignación de pesos a los criterios o en la escala de medida de las evaluaciones. Con una combinación lineal ponderada, los factores (en que en este caso son las coberturas antes descritas) son combinados aplicando un peso a cada uno ellos, seguido por una sumatoria de los resultados para producir un mapa de adecuación, es decir:

$$S = \sum w_i x_i$$

Donde:

S = adecuación.

$w_i$  = peso del  $i$ ésimo factor (cobertura)

$x_i$  = valor del  $i$ ésimo criterio de factor

Como se observa en la fórmula, la combinación lineal ponderada requiere la determinación de pesos de cada factor, en este caso, de cada una de las coberturas en juego. Esta decisión puede ser arbitraria o a juicio experto, sin embargo se recomienda que este proceso sea el resultado de una consulta a diferentes profesionales relacionados a la problemática bajo estudio.

Específicamente, la determinación de los pesos del mapa de zonificación sísmica y del mapa histórico de epicentro de sismos, fue determinado mediante la ponderación de coberturas en un proceso de consulta a expertos de la División de Planificación y Ordenamiento Territorial del GORE de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. Específicamente, la obtención de los factores ponderadores para cada cobertura fueron consensuadas por un equipo de 4 profesionales pertenecientes a las áreas de las ciencias de la tierra y el urbanismo, los cuales en sucesivas reuniones de trabajo que consideraron la naturaleza de los datos espaciales aportados en cada una de las coberturas involucradas, así como también el sentido lógico de los resultados preliminares aportados por el consultor.

Finalmente, el equipo de trabajo determinó que la cobertura de Zona de Demanda Sísmica será la que más aporte a la cobertura final con un 20% de la cobertura, mientras que la cobertura de Recurrencia Sísmica aportará el 80% de la cobertura final, el resultado se observa en la Figura 31.

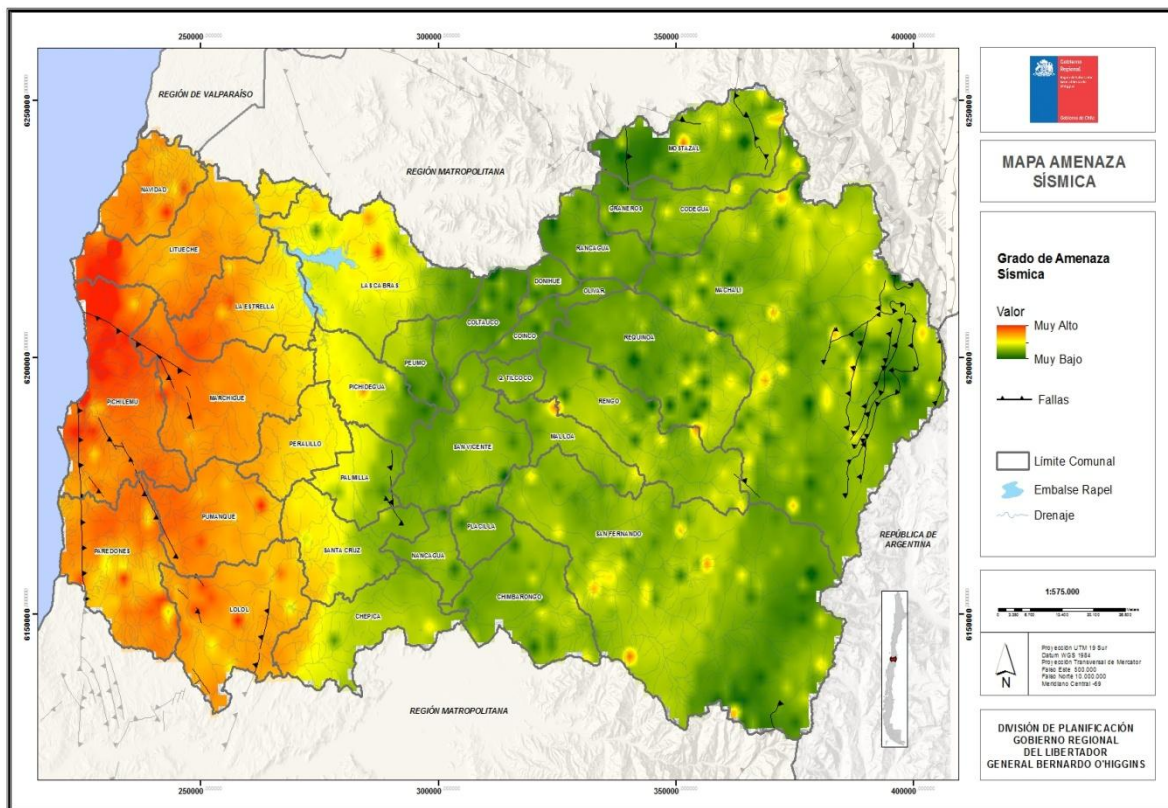


Figura 31. Mapa de amenaza sísmica resultante de la ponderación del mapa de demanda sísmica y de recurrencia sísmica. Fuente: Gobierno Regional de O'Higgins, 2012.

## 5.3 Resultados.

### 5.3.1 Actividad sísmica en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

En Chile Central existen tres zonas sismogénicas relativamente bien definidas. La primera comprende grandes sismos superficiales (0-50 km) de corteza que ocurren a lo largo de la costa. La segunda incluye sismos más profundos (70-100 km) generados por esfuerzos compresionales o extensionales en la placa de Nazca. La tercera zona sismogénica comprende los sismos superficiales (0-20 km) registrados en el Cordón Andino (Barrientos 2007). Leyton et al., (2010) definen los sismos de estas zonas como interplaca, intraplaca de profundidad intermedia y sismos corticales.

Dichas zonas son claramente identificables en la Figura 31 donde se muestra la distribución y profundidad de los sismos ocurridos entre 1973 y 2012, a la altura de Santiago, la cual es homologable a la de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. Estas zonas sísmicas están directamente relacionadas con las grandes unidades del relieve. Cabe destacar, que en la Figura 28 se incluyen sismos menores a 3 grados de magnitud Richter que generalmente no son sensibles para la población.

Los sismos interplaca han sido los que han registrado mayor magnitud históricamente. El sismo de mayor magnitud en la región de O'Higgins tuvo su epicentro cerca del Lago Rapel, registró una magnitud  $M_s=7.5$  y ocurrió el 8 de abril de 1985. Este sismo causó dos víctimas fatales (una en la región Metropolitana y otra en la región del Biobío) aunque no por caída de materiales si no por problemas cardiacos (El Mercurio 2010).



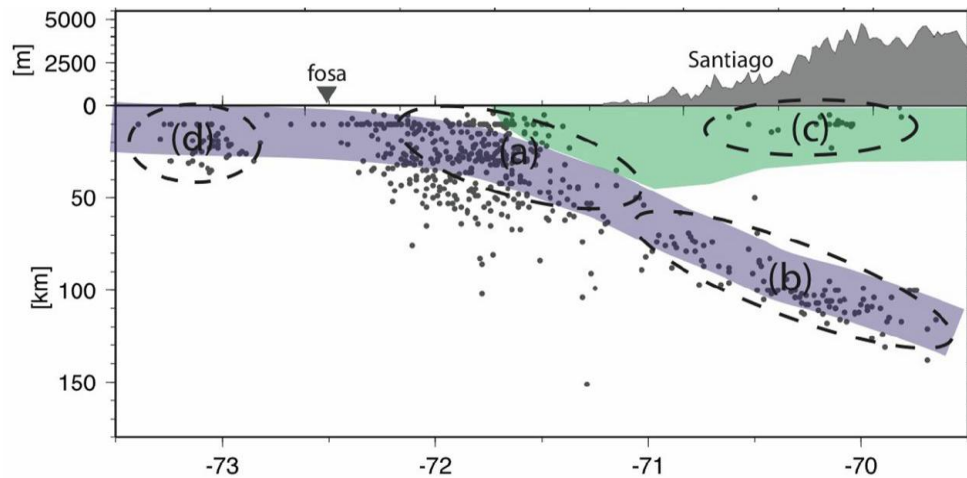


Figura 32. Corte Oeste – Este, a la altura de Santiago, donde se presentan esquemáticamente la posición de la placa de Nazca (en morado) y Sudamericana (en verde); cada punto marca la posición de un sismo independiente de su magnitud o fecha de ocurrencia. Se marca la posición de las fuentes: (a) interplaca tipo thrust, (b) intraplaca de profundidad intermedia, (c) cortical y (d) outer-rise. Fuente: Leyton 2010.

El año 2010, se registraron en la región de O'Higgins, al menos cuatro sismos con magnitudes Richter  $\geq 6$  e hipocentros con profundidades entre 11 y 35 km. Estos sismos son probablemente réplicas del terremoto de  $M_w=8.8$  que afectó gran parte de Chile el 27 de febrero de 2010 o, están asociados a cambios en el estrés tectónico producido por dicho evento. En la Tabla 19. se indican los diez sismos de mayor magnitud registrados en la Región de O'Higgins entre 1973 y 2012.

Fecha	Latitud	Longitud	Comuna	Magnitud	Profundidad (km)
08/04/1985	-34.13	-71.62	Litueche	7.5 Ms	37
11/03/2010	-34.33	-71.8	Marchihue	7 Mw	18
11/03/2010	-34.29	-71.89	Pichilemu	6.9 Mw	11
04/03/1985	-34.12	-71.9	Litueche	6.2 Ms	33
27/02/2010	-34.7	-71.83	Paredones	6 Mb	35
11/03/2010	-34.47	-72	Pichilemu	6 Mb	31
02/05/2010	-34.23	-71.88	Pichilemu	5.9 Mw	13
28/02/2010	-34.16	-71.95	Litueche	5.9 Mw	31
12/03/2010	-34.23	-71.92	Pichilemu	5.8 Mw	7
20/01/1978	-34.28	-70.19	Machalí	5.7 Mb	132

Tabla 18. Localización, magnitud y profundidad de los diez sismos de mayor magnitud registrados en la Región de O'Higgins en el periodo 1973-2012.



### 5.3.2 Riesgo Sísmico.

Existen tres grandes áreas con distintos niveles de riesgo sísmico a nivel regional. La zona de sismos interplaca es la que presenta un mayor riesgo debido que a ésta se asocian los eventos de mayor magnitud histórica. Dichos eventos pueden ser percibidos y generar daños en áreas tanto dentro, como fuera de la región. Sin embargo, el riesgo sísmico en dichas zonas sismogénicas se ve atenuado o acentuado localmente por las características geológicas de cada sitio. En general áreas compuestas por materiales poco consolidados (e.g. terrazas fluviales recientes) o localizadas sobre divisorias de aguas, tienden a amplificar las ondas sísmicas y aumentar los daños en la infraestructura. Mientras que la roca consolidada suele atenuar dichos efectos.

El riesgo sísmico en la región está condicionado además por la presencia de fallas. En la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins el mayor número de fallas se ubica en la Cordillera de los Andes, en la cuenca superior del río Cachapoal. Naturalmente fallas activas (con evidencia de actividad sísmica en los últimos 10.000 años y posibles generadoras de nuevos sismos) son las que representan mayor riesgo sísmico. No obstante en el mapa de riesgos no se hace esta distinción debido a que la fuente utilizada (SERNAGEOMIN 2003) no registra esta información.

### 5.3.3 Riesgo Sísmico y Sistemas Estratégicos.

En la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins la zona de mayor riesgo sísmico abarca una franja de aproximadamente 70 kilómetros de ancho desde la costa hacia el oriente. En dicha zona existen numerosos asentamientos poblados y otros componentes de sistemas estratégicos que pueden verse afectados por movimientos sísmicos cercanos. Entre los centros poblados de mayor jerarquía se encuentra Pichilemu. Cabe señalar que los sismos, dependiendo de su magnitud y profundidad, pueden generar daños en áreas distantes decenas a centenas de kilómetros de su zonas de origen. Naturalmente dichos daños son inversamente proporcionales a la

distancia respecto al epicentro. En la Tabla 19. se da una gruesa idea de los sistemas estratégicos ubicados en la zona de mayor riesgo sísmico en la región.

Debido a que la zona de alto riesgo sísmico abarca una superficie significativa del territorio regional, incluyendo localidades en el borde costero y ciudades y asentamientos rurales en el secano, los sistemas estratégicos susceptibles de ser afectados por sismos con epicentros cercanos son numerosos. Entre las localidades se cuentan por ejemplo, Pichidegua, Navidad, Lolol y La Estrella entre otros. Cabe destacar que existen al menos 34 embalses, cuya eventual falla, puede generar daños por inundación.

SISTEMAS ESTRATÉGICOS UBICADOS EN ZONAS DE ALTO RIESGO SÍSMICO EN LA REGIÓN DE O'HIGGINS.				
Asentamientos humanos	Redes Vitales	Instalaciones esenciales	Redes de transporte	Instalaciones con alto potencial de daños
Al menos 16 centros urbanos.	Líneas de transmisión eléctrica. (Tramo Quelentaro-Portezuelo)	Más de 180 centros educativos.	Diversas rutas incluyendo la ruta I-80-G, I-50 e I-70 entre otras.	34 embalses
19 asentamientos pesqueros.		36 establecimientos municipales.		
Decenas de asentamientos rurales.		19 recintos de carabineros.		
		26 recintos de bomberos.		

Tabla 19. Sistemas estratégicos ubicados en zonas de alto riesgo sísmico en la Región de O'Higgins.

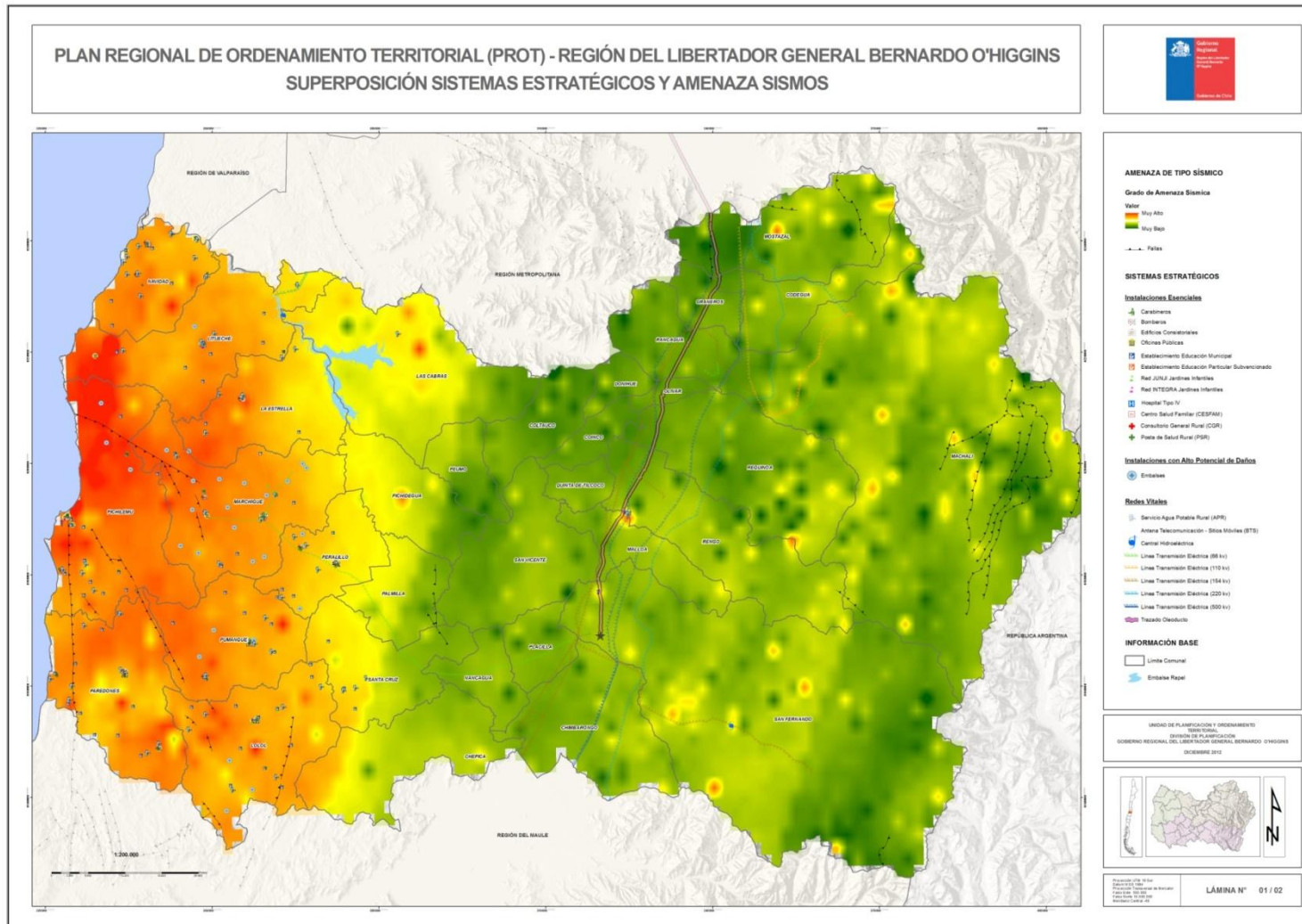


Figura 33. Mapa Amenaza Sísmica y Sistemas Estratégicos ( Parte 1) Fuente: Gobierno Regional de O´Higgins, 2012.

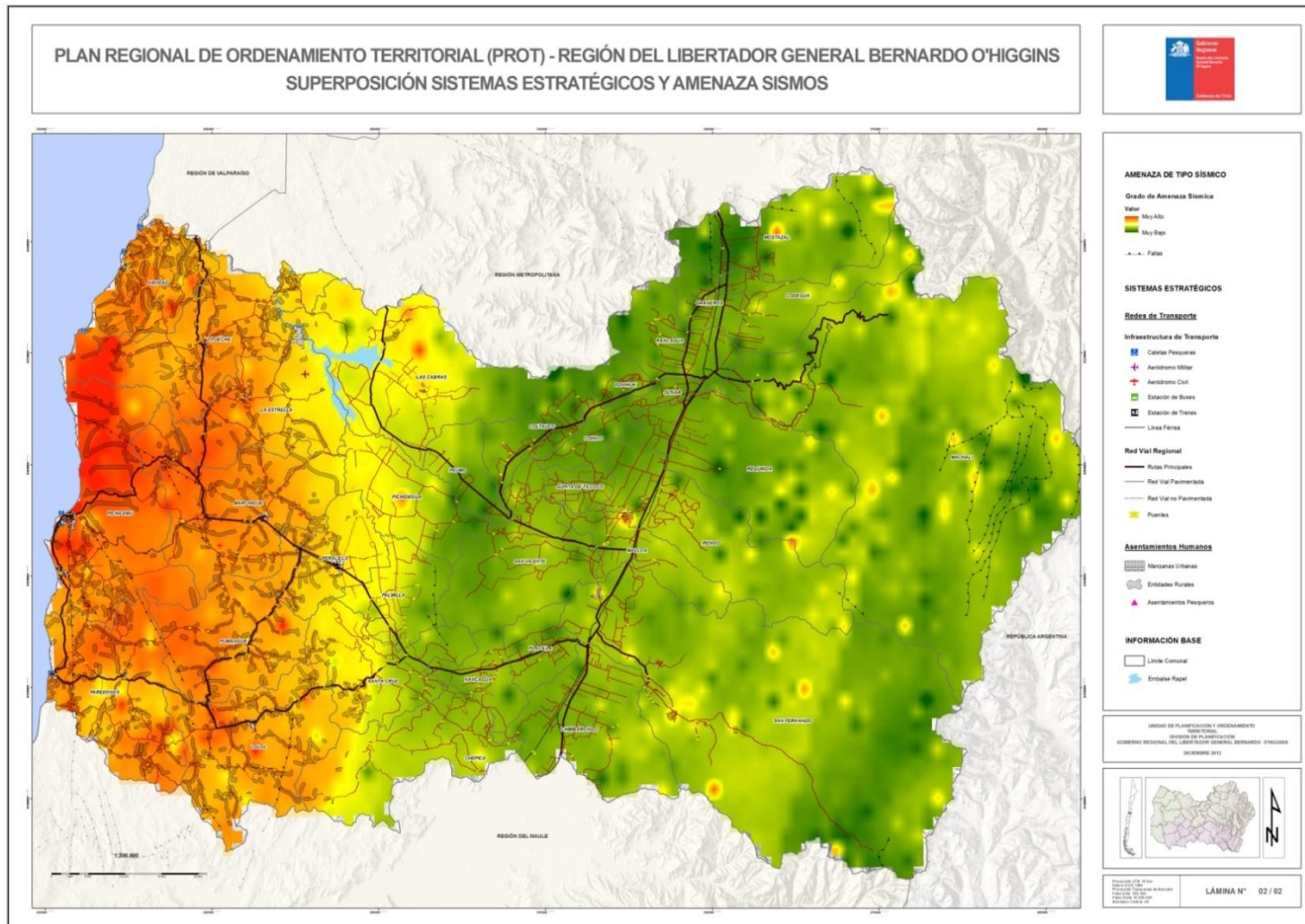


Figura 34. Mapa Amenaza Sísmica y Sistemas Estratégicos. ( Parte 2) Fuente: Gobierno Regional de O´Higgins, 2012



## **5.4 Conclusiones y Recomendaciones.**

La Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, al igual que todo el territorio nacional ubicado en la zona de convergencia de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana (entre los 18° y 47°S), está constantemente expuesta a la amenaza sísmica. No obstante los registros instrumentales demuestran que los eventos de mayor magnitud se han concentrado en el área comprendida entre la línea de costa y aproximadamente 70 km. al este. Dicha zona, constituye el área de mayor riesgo sísmico a nivel regional.

La clasificación de riesgo sísmico da una idea global de las áreas que presentan mayor actividad sísmica y de mayor significancia en cuanto a magnitud. No obstante dicha zonificación regional debe ser complementada con estudios geotécnicos de detalle para ser utilizada en instrumentos de regulación territorial, por ejemplo a escala municipal. Por otro lado, la estimación del riesgo sísmico (en términos de amenaza para la población) debe necesariamente incluir el análisis de la vulnerabilidad de la población y de la infraestructura y en sus dimensiones físicas y socioeconómicas.

## **5.5 Bibliografía**

- Grandes Terremotos en Chile, El Mercurio. Consultado el 20 de Diciembre de 2012.
- Algermissen, S.T. & Perkins, D.M. (1976) A probabilistic estimate of maximum acceleration in rock in the contiguous Unites States, U.S. Geological Survey Open-File Report 76-416, 45páginas.
- Algermissen, S.T., Perkins, D.M., Thenahus, S.L. & Bender, B.L. (1982) Probabilistic estimates of maximum acceleration and velocities in rock in the contiguous Unites States, U.S. Geological Survey Open-File Report 82-1033, 99 páginas.
- Algermissen, S.T., Kausel, E., Hanson, S. & Thenahus, (1982) Earthquake Hazard in Chile, Rev. Geofísica, 37, pp 195-218.

- Barredo, J. (1996). Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio. 1a. ed. Madrid, RA-MA. 264 p.
- Barrientos, S. 2007. Earthquakes in Chile. In The Geology of Chile (Moreno, T.; Gibbons, W.; editors). The Geological Society of London: 263-287. London.
- Comte, D.; Eisenberg, A.; Lorca, E.; Pardo, M.; Ponce, L.; Saragoni, R; Singh, S.K.; Suárez, G. 1986. The 1985 central Chile earthquake: A repeat of previous great earthquakes in the region? Science 233:393-500.
- Gómez, M. & Barredo, J. (2005). Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio. Ed. Alfaomega Ra - Ma. 280 pp. España.
- Gudmundsson, O.; Sambridge, M. 1998. A regionalized upper mantle (RUM) seismic model. Journal of Geophysical Research B4:7121-7136.
- Gutenberg, B. & Richter Ch. (1944) Frequency of earthquakes in California. Bull. Seism. Soc. Am., pp 185-188.
- Instituto de Estudios Urbanos y Territoriales (2011) Estudio de Riesgo de Sismos y Maremoto para Comunas Costeras de las Regiones de O'Higgins y del Maule". Facultad de Arquitectura, Diseño y Estudios Urbanos de Universidad Católica de Chile.
- Kanamori, H., and Cipar, J.J., 1974, Focal processes of the Great Chilean earthquake May 22, 1960: Phys. Earth Planet. Int., v. 9, p. 128-136
- Koshimura, S; Yanagisawa, H. 2007. Developing fragility functions for tsunami damage estimation using the numerical model and satellite imagery. 5th International Workshop on Remote Sensing Applications to Natural Hazards. Washington DC, p. 1-6.
- Lapajne J.; Motnikar, B.S.; Zupancic, P. 2003. Probabilistic seismic hazard assessment methodology for distributed seismicity. Bulletin of the Seismological Society America 93:2502-2515.
- Leyton, F., Ruiz, S., & Sepúlveda, S.A. (2009) Preliminary reevaluation of probabilistic seismic hazard assessment in Chile: from Arica to Taitao Peninsula, Advances in Geosciences, 22, 147-153.
- Leyton, F. Ruiz, S. & Sepúlveda, S. (2010) Reevaluación del Peligro Sísmico en Chile Central, Andean Geology.



- Saaty, T. (1998). Método Analítico Jerárquico (AHP): Principios Básicos. EN: Evaluación y decisión multicriterio. Reflexiones y experiencias. Santiago, Chile, Universidad de Santiago, pp.: 17-45.
- Saaty, T. (1977). A scaling method for priorities in hierarquical structure. Journal of mathematical psychology. 15: 234 – 281.
- Sernageomin, 2003. Mapa Geológico de Chile: Versión Digital. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Digital 4.
- SHOA. 2003. Tablas de marea de la costa de Chile. Publicación n° 3009. p.247.
- Shuto, N. 1993. Tsunami intensity and disasters. In Tsunamis in the World, S. Tinti, ed., Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, p. 197-216.

## 6. AMENAZA DE INUNDACIÓN POR RUPTURA DE EMBALSES.

### 6.1 Introducción.

Los embalses son obras hidráulicas que represan y regulan la descarga fluvial con diferentes fines. Entre estos fines destacan la administración del recurso hídrico para su uso en la actividad agrícola e industrial, el consumo humano, la generación de energía hidroeléctrica y el control de inundaciones. Dichas obras necesitan constantes tareas de monitoreo y mantenimiento para permitir su operación de manera segura.

A pesar de los beneficios que estas obras proveen, los embalses también pueden constituir amenazas significativas para la población e infraestructura ubicada aguas abajo. Los embalses pueden fallar a través de diferentes mecanismos y generar inundaciones de gran alcance (km. a centenas de km.). Entre los factores que condicionan o causan comúnmente la falla de embalses se encuentran un diseño de obras inadecuado o con materiales deficientes y la falta de mantenimiento. Existen además factores externos que pueden causar la ruptura de embalses como actividad sísmica, eventos meteorológicos extremos y el impacto de movimientos en masa.

A nivel mundial existen numerosos ejemplos de desastrosas inundaciones causadas por la repentina y violenta descarga del agua almacenada en embalses. El caso más notable ocurrió en la Provincia de Henan, China en agosto de 1975. En este evento, conocido como el desastre de Banquiao, fallaron en cadena 62 embalses. En total se liberaron varios billones de metros cúbicos de agua en pocas horas generando más de cien mil víctimas fatales. El evento fue generado por precipitaciones excepcionalmente intensas, sumadas a deficiencias en el diseño de los embalses (Yi 1998).

En Chile se han registrado inundaciones por falla de embalses aunque de menores proporciones. La más reciente ocurrió en octubre de 2012 en la cuenca del Río Elqui. Un embalse de regadío con capacidad para 30.000 m<sup>3</sup> falló por deficiencias en su diseño y mantenimiento dejando a ocho familias damnificadas (Diario El Día, 2012).

Aunque no hay registros de inundaciones por falla de embalses en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, existen numerosos embalses que constituyen potenciales amenazas para la población en diversas cuencas de la región. En este informe se analiza la amenaza asociada a los embalses de mayores dimensiones, en base a criterios de construcción y operatividad. Este análisis es conocido como HAZOP por la abreviatura de los términos en inglés *Hazard* (amenaza) y *Operability* (operatividad).

### **6.1.1 Objetivo.**

El informe tiene como objetivo evaluar el grado de amenaza que representan los embalses de la región, e identificar potenciales zonas en riesgo de inundación en caso de falla.

## **6.2 Metodología.**

### **6.2.1 Información Base.**

Para todos los efectos del presente análisis, la información base de los embalses ubicados en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, fue obtenida a partir del catastro de embalses realizado por la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas (en adelante DGA). Dicho catastro identifica 54 embalses (Tabla 20.) cuya ubicación se observa en la Figura 31.

### **6.2.2 Estimación de la Amenaza.**

Para la evaluación de la estabilidad de los embalses se requiere de detallados estudios técnicos, tanto del diseño, los materiales utilizados para su construcción, como de las tareas de mantención y operación de los mismos. En este informe dicha información fue recopilada de estudios previos realizados por la DOH -DGA, la cual permitió clasificar los embalses en diferentes categorías de amenaza de acuerdo a su estado actual.

La clasificación de amenaza de los embalses se basó en el grado de estabilidad de las presas, tanto en condiciones estáticas como ante perturbaciones sísmicas, considerando diferentes niveles de llenado.

Dicha información fue integrada con el análisis del nivel de la filtración que presenta cada embalse. El nivel de infiltración o *piping* fue evaluado utilizando el criterio de Lane. Ambos análisis fueron utilizados para calcular el índice HAZOP de cada embalse.

1 Aguadilla	19 La Esperanza	37 Piedras Blancas o Pailimo II
2 Alcones	20 La Gloria (La Cruz)	38 Picarquín
3 Alto Colorado	21 La Rosa	39 Piuchén
4 Callihue	22 La Troya	40 Pilaicito
5 Carrizal	23 Laquilla	41 Porotal
6 Chancón	24 Lolol	42 Quesería
7 Cocaquén o Pailimo I	25 Los Maitenes	43 Rinconada (La Macarena)
8 Convento Viejo 1	26 Los Maquis	44 Romeral M1
9 Culenco	27 Los Negros	45 Romeral M2
10 El Cardonal	28 Los Novios	46 Salto De Agua
11 El Guaico	29 Los Sapos	47 San Guillermo
12 El Huique	30 Mallermo	48 San Isidro
13 El Rincón	31 Millahue	49 San José de Las Pataguas
14 Embalse Rapel	32 Nilahue	50 San Vicente
15 Esmeralda	33 Pailimo	51 Santa Isabel
16 Guido Soto	34 Panilonco	52 Santa Margarita (Santa Lucia)
17 Idahue	35 Patagua Cerro Guirabo	53 Tierruca
18 Jaime Ramírez	36 Pataquilla	54 Yervas Buenas (Santa Julia)

Tabla 20. Embalses ubicados en la Región de O'Higgins. Fuente: DGA -MOP

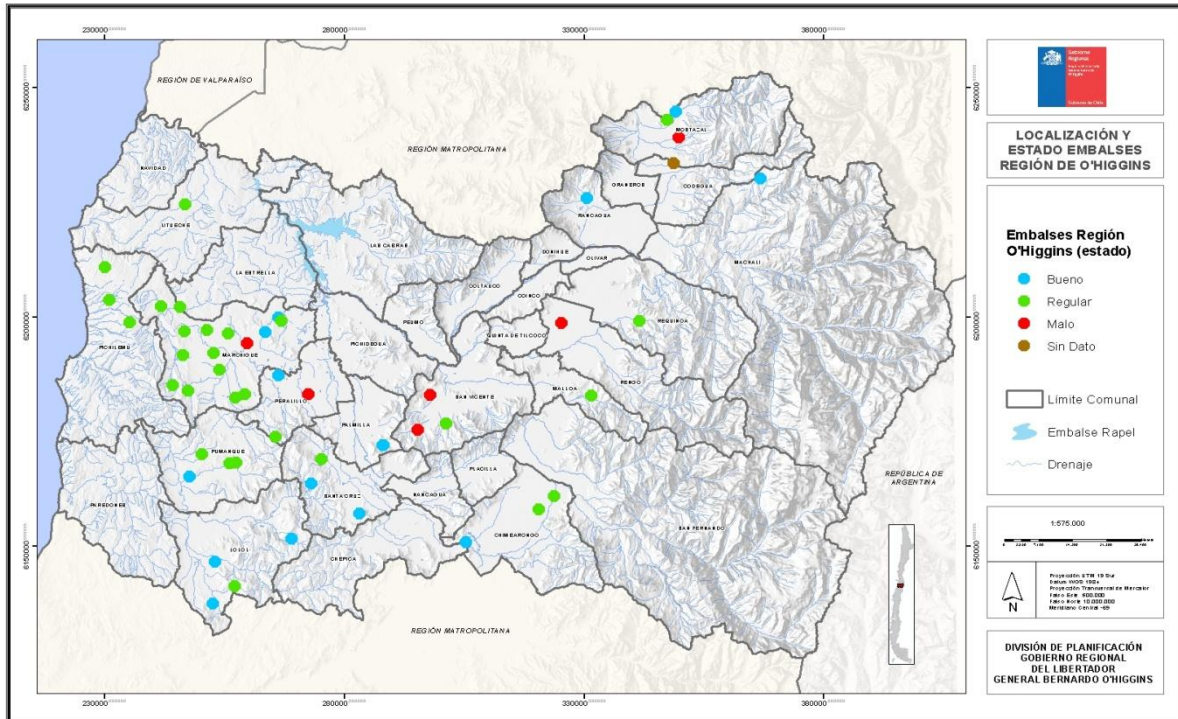


Figura 35. Mapa de ubicación de y estado embalses de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. Fuente: DGA-MOP.

Este índice es un planteamiento probabilístico de análisis de la relación causa-efecto en un sistema y puede estimar el riesgo de cese de función a causa de eventos catastróficos en diversas construcciones y sus consecuencias (R.E.G Ingenieros Consultores, 2010).

En general, el primer paso en el análisis de riesgo de HAZOP corresponde a la identificación del sistema, de modo de establecer la estructura central del mismo, la cual será la parte afectada y la causante a la vez. En términos simples se pueden identificar los siguientes pasos:

- a) Identificar el objeto de análisis, es decir, aquella obra o sistema que pueda ser afectada por agentes externos y que a su vez, una falla parcial o total produzca efectos sobre otras partes del sistema dependientes de ella.
- b) Identificar aquellos fenómenos o agentes que pueden ocasionar daños o alteraciones al ente identificado en el punto anterior.

- c) Identificar los efectos potenciales que tendría en el resto del sistema, la falla o alteración del ente identificado.

La formulación general del Método está definida por la relación:

$$R = P * V * E$$

En que:

- R: Riesgo total del sistema frente a un evento dado y para una causa determinada.
- P: Probabilidad de que se produzca el evento identificado como desencadenante de una falla o alteración en la estructura principal.
- V: Vulnerabilidad de la obra principal ante la ocurrencia del evento desencadenante representado por la probabilidad "p".
- E: Potencialidad de que ante la falla o alteración de la obra por el evento de probabilidad "p", se produzca el efecto identificado o que se desea analizar.

Éste método ha sido adaptado al análisis del riesgo de falla de embalses de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, con consecuencia de daños hacia aguas abajo, ya sea a las personas, obras de infraestructura y las zonas agrícolas (R.E.G Ingenieros Consultores, 2010).

Los eventos desencadenantes para una falla de estos tranques, han sido seleccionados de entre el grupo de aquellos más destructivos, o que se conoce que han sido los causantes de fallas conocidas. Estos eventos, que se han definido en un total de 5, están constituidos por los siguientes:

- a) Sismos de placa de gran magnitud y baja frecuencia y, de mediana magnitud y alta frecuencia de ocurrencia.
- b) Sismos cordilleranos de gran magnitud y baja frecuencia y, de mediana magnitud y alta frecuencia de ocurrencia.
- c) Crecidas pluviales para periodos de retorno de 10, 100 y 10.000 años.



- d) Crecida nival en los casos que corresponda.
- e) Sifonamiento o Piping.

La vulnerabilidad de cada embalse es analizada de manera específica para cada evento desencadenante, de la siguiente forma:

- **Eventos Sísmicos:** Se determina para cada embalse de acuerdo a su ubicación, la aceleración máxima resultante para cada uno de los sismos elegidos. Con la aceleración, los parámetros resistentes y la forma de cada muro, se procede a realizar un estudio de estabilidad, el cual indica la existencia de fallas, su ubicación y la curva de factor de seguridad para los diferentes planos de deslizamientos.
- **Eventos de Escorrentía:** Se determina para cada embalse, de acuerdo a los datos recolectados en terreno, la capacidad máxima de las obras de evacuación con todas las condicionantes que sea pertinente considerar. La capacidad de evacuación se considera en términos nominales en relación a la capacidad de diseño de la obra, es decir, dentro de los rangos operacionales normales. A continuación se estima la capacidad de evacuación en condiciones extremas, esto es, cuando el nivel de agua está a punto de verter por sobre el coronamiento, sobrepasando el muro.

La vulnerabilidad en cada caso se estima en función de la relación entre el caudal afluente y el caudal evacuado, sin considerar el efecto regulador del embalse, dado que se asume embalse lleno. Al asumir embalse lleno, se supone que ya no hay efecto de regulación, pues el agua que llegue en forma adicional estará disminuyendo el factor de seguridad del embalse, al ocupar el volumen dado por la revancha considerada para la obra. Por lo general, el volumen dado por la revancha de las obras es de poca cuantía, además al asumir esta consideración, se elimina cualquier error de subestimar la seguridad del embalse.

- **Evento de Piping:** Se determina para cada embalse, de acuerdo a la geometría del muro, el tiempo de estabilización del flujo; con la que nos daría el tiempo que demora una línea de flujo en recorrer el suelo por debajo del muro. A continuación,

dependiendo del tiempo de estabilización del flujo y de la antigüedad de la presa, se determina la probabilidad de ocurrencia del evento.

La vulnerabilidad se determina dependiendo del estado de saturación o filtración en que se encuentra el muro. Además, se considera si el material del muro es cohesivo o no y si tiene sistema de drenaje.

Para el análisis de riesgo de inundación se aplicó un buffer de 100 m. a lo largo de los primeros 25 km. de la red de drenaje aguas abajo de los embalses menos estables, este criterio fue adoptado sobre la base del promedio de volumen de agua contenidos por los embalses bajo estudio, por este motivo deben ser considerados como una aproximación conservadora. Posteriormente, se identificaron las obras de infraestructura y asentamientos poblados ubicados en dicha zona. Cabe señalar que los parámetros asignados son arbitrarios y sirven sólo de modo ilustrativo. Debido a esto y a que se desconoce la vulnerabilidad socioeconómica de la población y de la vulnerabilidad física de la infraestructura y otros bienes materiales, la estimación del riesgo es sólo referencial.

## **6.3 Resultados.**

### **6.3.1 Análisis de estabilidad y grado de amenaza de inundación por falla de embalses.**

En la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins existen al menos 53 embalses, en diferentes estados de conservación. El estado de las obras en 15 embalses es bueno, en 31 es regular, y en 6 embalses es malo. Además existe un embalse sin información (El Rincón). Cabe destacar que cuatro embalses se ubican en el extremo norte de la región y son parte de la red de drenaje del Río Maipo (Figura 33.).

Los factores de mayor riesgo de falla en cada embalse son diferentes. Existen 25 presas que son más susceptibles a fallar ante solicitudes sísmicas. Mientras que las

presas de los 27 embalses restantes son más susceptibles a fallar por cambios abruptos en la escorrentía.

Del índice *HAZOP* se desprende que existen al menos 7 embalses que requieren especial atención debido a que son menos estables y pueden fallar ante eventos meteorológicos o sísmicos significativos. Algunas características de estos embalses se señalan en la Tabla 21.

Cabe señalar que las presas de mayor altura pueden liberar el agua acumulada con mayor energía que las presas menores y por lo tanto pueden provocar flujos más destructivos al tener peak de caudales más elevados. Por otro lado, mientras mayor volumen tenga el embalse, mayor es la probabilidad de que la inundación afecte zonas más extensas. En este caso los embalses con mayor capacidad de almacenamiento de agua son Aguadilla y Picarquín.

Embalse	Cuenca	Subcuenca	Capacidad máxima Mm <sup>3</sup>	Altura de la presa (m)	Evacuación de crecidas
<b>Alto Colorado</b>	Qbda. Del Espino	Qbda. Del Espino	0.36	10.33	Vertedero caída libre en estado regular
<b>Aguadilla</b>	Rapel	Río Tinguiririca	1.39	7.54	Vertedero caída libre en mal estado
<b>Tierruca</b>	Rapel	Río Tinguiririca	0.09	5	Vertedero caída libre en buen estado
<b>Piuchén</b>	Tinguiririca	Estero Las Cadenas	0.05	2.8	Vertedero caída libre en mal estado
<b>Pataguilla</b>	Nilahue	Estero Nilahue	0.45	12.67	Vertedero caída libre en estado regula
<b>Picarquín</b>	Maipo	Río Angostura	1.3	18.6	Vertedero caída libre en estado regular
<b>Santa Lucía</b>	Tinguiririca	Estero Las Cadenas	0.29	7.97	Vertedero caída libre estado regular

Tabla 21. Ubicación y características de los embalses con índices HAZOP más altos en la Región de O'Higgins. Fuente: CSW Consultores Ambientales.

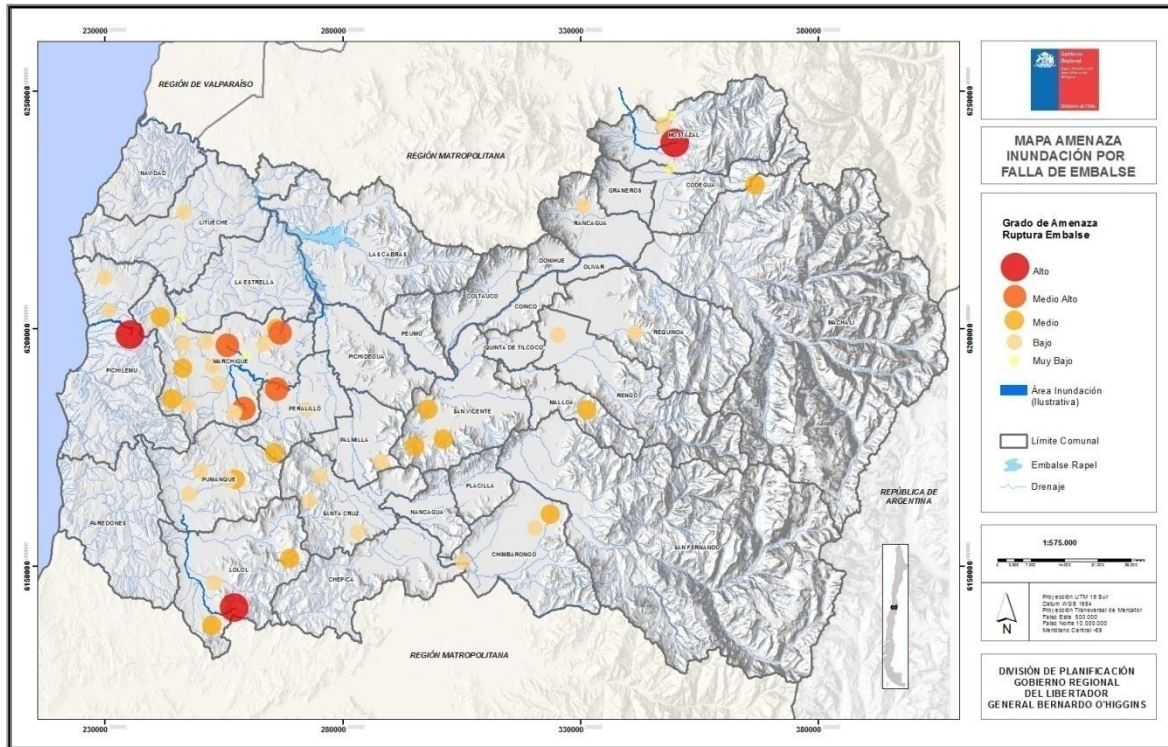


Figura 36. Grado de amenaza de inundación por falla de embalses. Fuente: Gobierno Regional de O'Higgins.

### 6.3.2 Identificación de Sistemas Estratégicos en Riesgo.

Aunque incluso embalses con represas y obras de evacuación de aguas en buen estado pueden fallar ante eventos sísmicos o meteorológicos extremos, en este informe sólo son analizados los posibles efectos en la población producidos por la falla de los 7 embalses calificados con índices *HAZOP* más altos. En la Tabla 22. se sintetiza la información respecto a posibles daños asociados a la ruptura de estos embalses.

Embalse	Sistemas estratégicos que pueden ser afectados por la falla del embalse				
	Asentamientos humanos	Redes Vitales	Instalaciones esenciales	Redes de transporte	Instalaciones con alto potencial de daños
Alto Colorado	Entidades rurales	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna
Aguadilla	Entidades rurales y urbanas (Marchigue)	Línea de transmisión eléctrica 66kv	Ninguna	Cruce H-76 Los Maitenes	Ninguna
Tierruca	Entidades rurales	Ninguna	Ninguna	Los Maitenes Cruce Ruta 90 Marchigue.	Ninguna
Piuchén	Entidades rurales y urbanas (Marchigue)	Línea de transmisión eléctrica 66kv	Ninguna	Cruce I-660 Marchant. Cruce I-60 La Quebrada. Cruce H-76 Los Maitenes.	Ninguna
Pataguilla	Entidades rurales	Ninguna	Ninguna	Cruce I-72 La Palma Cruce I-70j Ranguil Cruce I-566-J San Pedro de Alcántara Cruce I-72-Alcántara-Santa Cruz-Bucalemu.	Ninguna
Picarquín	Entidades rurales y urbanas (San Francisco de Mostazal)	Línea de transmisión eléctrica 110kv Línea de transmisión eléctrica 220kv	Municipalidad de San Francisco de Mostazal.	Cruce Ex ruta 5 Rancagua. Longitudinal Sur Cruce H-115-G	Ninguna
Santa Lucía	Entidades rurales	Ninguna	Ninguna	Cruce H-76 Los Maitenes-San Vicente-San José de Marchigue.	Ninguna

Tabla 22. Sistemas estratégicos de la Región de O'Higgins afectados por amenaza de inundación por ruptura de embalses. Fuente: CSW Consultores Ambientales.

En general los sistemas estratégicos mayormente afectados por la eventual falla de un embalse son tierras agrícolas en entidades rurales y redes de transporte. En casos particulares podrían verse dañadas también redes vitales, particularmente líneas de transmisión eléctrica. A continuación se describen algunos de estos antecedentes para cada embalse.

### **6.3.2.1 Embalse Alto Colorado.**

El embalse Alto Colorado se localiza en los faldeos occidentales de la Cordillera de la Costa. Esta zona está escasamente poblada y comprende sólo tierras destinadas a la actividad silvícola y agraria. Las aguas del embalse drenan hacia un afluente de la Quebrada Los Espinos, a lo largo de la cual no existen poblados ni otros componentes de sistemas estratégicos susceptibles de ser dañados.

### **6.3.2.2 Embalse Aguadilla.**

Este embalse se ubica aguas arriba de Marchigue aproximadamente 6 km. al norte del pueblo. Sus aguas drenan al Estero Chequén, afluente del Estero Las Cadenas. El desnivel topográfico entre El Embalse y Marchigue es de alrededor de 20 metros. En caso de fallar este embalse probablemente las zonas más bajas de esta localidad se verían afectadas, además de obras de infraestructura ribereñas y tierras agrícolas. Cabe destacar que existe otro embalse inmediatamente al este que podría verse afectado por la crecida aumentando su potencial destructivo.

### **6.3.2.3 Embalse Tierrauca.**

Este embalse drena hacia el Estero San Miguel, tributario del Río Tinguiririca. Aguas abajo del embalse existen tierras agrícolas con casas aisladas. El centro poblado más cercano al embalse es San José de Marchigue ubicado aproximadamente 10 km aguas abajo. En caso de fallar este embalse, este poblado además de infraestructura ribereña y tierras agrícolas podrían ser afectados.

### **6.3.2.4 Embalse Piuchén.**

El Embalse Piuchén se ubica aguas arriba de Marchigue aproximadamente 8 km. en línea recta al sur de dicha localidad. Este embalse vierte sus aguas al Estero Grande de



Piuchén afluente del Estero Las Cadenas. Aguas abajo del embalse existen tierras agrícolas y casas aisladas. El centro poblado más cercano es Marchigue.

En caso de fallar el embalse las tierras agrícolas inmediatamente abajo del embalse probablemente serían más afectadas. Debido al reducido volumen de agua de embalse (0.05 Mm<sup>3</sup>) los efectos de la inundación se reducirían notoriamente valle abajo.

#### **6.3.2.5 Embalse Pataguilla.**

El Embalse Pataguilla vierte sus aguas a la Quebrada El Molino que es afluente del Estero Nilahue. No existen localidades ribereñas que puedan verse afectadas ante una eventual crecida por fallas del embalse, a más de 20 km. aguas abajo de la represa. No obstante, existen tierras agrícolas e infraestructura vial que podría verse afectada. Cabe destacar que el embalse se ubica en una zona de gran relieve que podría provocar un flujo de gran energía en los primeros km. de recorrido.

#### **6.3.2.6 Embalse Picarquín.**

El Embalse Picarquín vierte sus aguas al estero del mismo nombre y se ubica aproximadamente 7 km. aguas arriba de la localidad de San Francisco de Mostazal. En caso de una ruptura del embalse, esta localidad y probablemente la localidad de La Punta (ubicada 3 km. al sur) podrían verse afectadas.

#### **6.3.2.7 Embalse Santa Lucía.**

El Embalse Santa Lucía vierte sus aguas en una pequeña quebrada que tras un km. de recorrido confluye con el Estero Las Cadenas. No existen asentamientos poblados ribereños a lo largo de más de 20 km aguas abajo del embalse. La localidad más cercana es San José de Marchigue. No obstante, sí existen infraestructura vial y tierras agrícolas que podrían verse impactadas ante una eventual ruptura de este embalse.

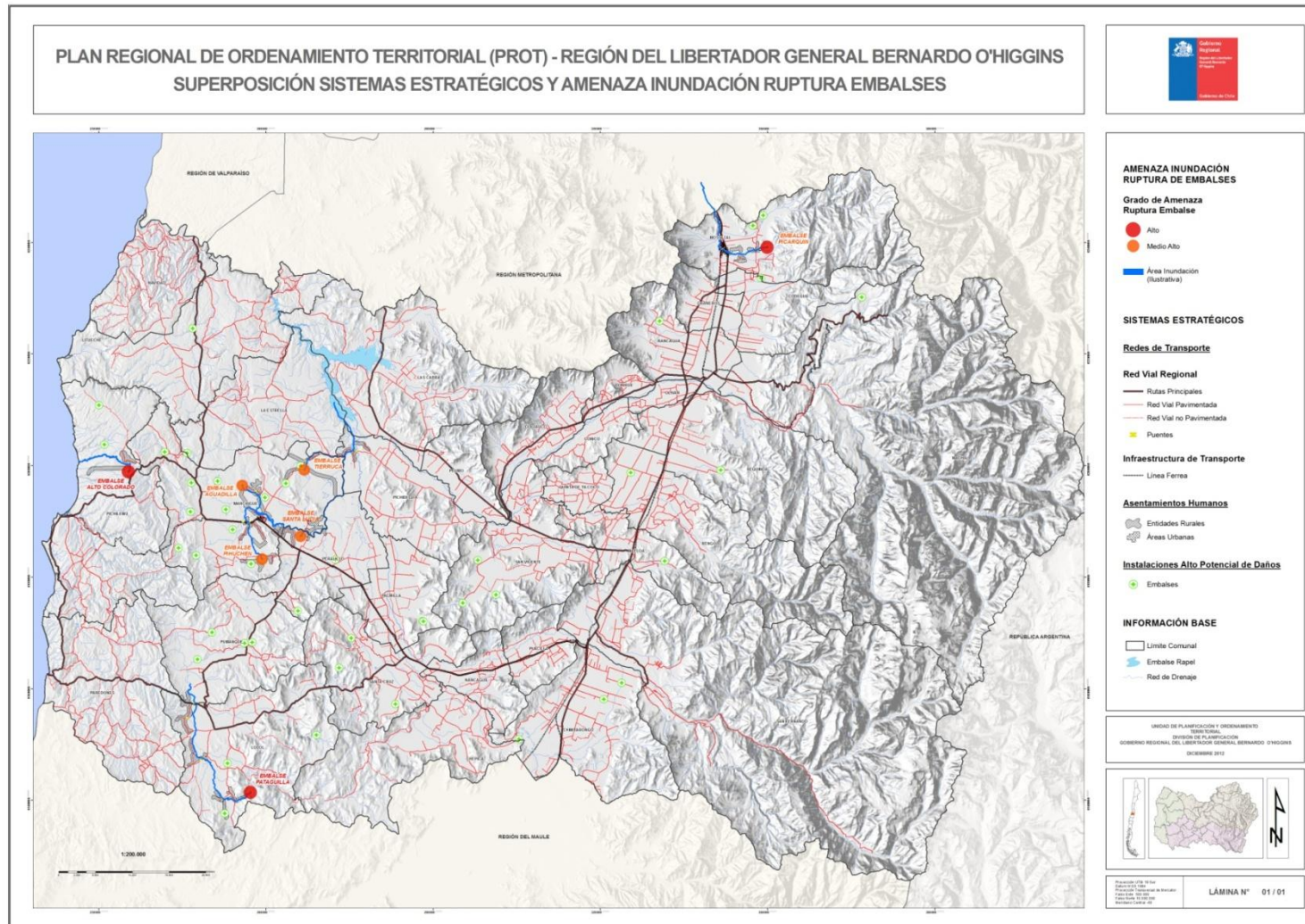


Figura 37. Mapa Amenaza de Inundación por falla de Embalses y Sistemas Estratégicos. Fuente: Gobierno Regional de O'Higgins, 2012.

## 6.4 Conclusiones y Recomendaciones.

Los embalses de la región representan diferentes niveles de amenaza para la población que vive aguas abajo. En la zona de secano se ubican los embalses menos estables ante sismos o eventos meteorológicos. Los embalses que revierten mayor riesgo en general tienen baja capacidad de almacenamiento de agua ( $\leq 1.39 \text{ Mm}^3$ ). No obstante la falla de abrupta de estos embalses puede generar cuantiosas pérdidas socioeconómicas. Por ello es necesario, entre otras cosas, actualizar la información respecto a la estabilidad de los embalses.

Por otro lado, el estudio de riesgo debe complementarse identificando correctamente las zonas susceptibles de ser inundadas ante diferentes escenarios de falla. Existen numerosos modelos hidrológicos integrados en Sistemas de Información Geográfica que permitir definir, con diferentes grados de precisión (generalmente relacionado con la resolución de la información topográfica utilizada), las áreas que se verían inundadas ante la falla de embalses. Entre estos modelos se destaca Hec-GeoRAS por su versatilidad y libre acceso (Ackerman, 2009). Conocer las áreas susceptibles de ser inundadas con precisión permitiría desarrollar planes de contingencia ante la eventual falla de estos embalses.

## 6.5 Anexo: Situación de Embalses Post – Terremoto.

Informe de cometido funcional 23 al 26 de marzo de 2010.

El Ingeniero Civil Enrique Acuña Almeida en conjunto con Don Luis Jara C. funcionario de la Dirección Regional del Ministerio de obras Públicas, visitaron los embalses Millahue, Pailimo I (Cocauquén), Pailimo II (Piedras Blancas), La Ariana, junto con tomar contacto con los encargados de los embalses Los Cristales y Lolol, todos ellos particulares.

Los embalses visitados incluido el embalse Lolol, que aunque no fue visitado se tuvo la posibilidad de ver fotos del estado en que quedó después del terremoto, presentan las mismas fallas en el muro principal. Las fallas son: grietas longitudinales en el coronamiento que abarcan un 60 a 70 % de su longitud, centradas, dejando un tramo hacia los empotramientos en los que aparecen unas grietas en 45°, y falla en el enrocado del paramento de aguas arriba motivado por un deslizamiento del tipo cuchara que deja en su parte superior un sector del material del muro de la presa al descubierto.

Estas grietas longitudinales, en mayor o menor medida, dejan ver la profundidad que llega en algunos casos a cerca de 2 metros.

La falla en el paramento de aguas arriba consiste en un derrumbe rotacional de forma de cuchara que deja en su parte superior una grieta y un abombamiento al pié.

La falla en el paramento deja en su parte superior una zona descubierta de enrocado por causa del deslizamiento y un gran volumen de material suelto al pié. En esta falla se puede notar que la grieta superior abarca casi la misma longitud que las grietas longitudinales del coronamiento y en los bordes deja una grieta de forma circular disminuyendo en los empotramientos la importancia de la falla.

Esta cuchara de deslizamiento genera un plano en el que se produjo la falla por corte del suelo y todo el material que se removió queda suelto y sin unión hacia el muro lo

que obligaría a su retiro y restitución por un relleno bien compactado, el que puede ser ejecutado con el mismo material que se retire.

### **Estado de embalses visitados.**

#### ▪ **Tranque Millahue.**

Se ubica en la comuna de San Vicente de Tagua Tagua. Se tuvo contacto con los Sres. Walter Contreras Zamorano (Presidente de los Regantes, 9 180 56 87), Oscar Contreras Tapia (Tesorero, 9 522 55 20) y Luis Aliaga Contreras (Celador, 7 415 29 39).

El muro tiene una longitud de unos 550 a 600 metros con una altura máxima de 10 metros, un ancho de coronamiento de 7 metros y taludes 2:1 (H:V) tanto hacia aguas arriba como aguas abajo. No se conoce su estructura interior.

El deterioro que presenta es de prácticamente toda la estructura en la parte central (unos 200 metros de la longitud) ya que el deslizamiento tipo cuchara compromete más allá de lo que pudiera ser el corazón impermeable del mismo, dando la impresión que no existiera esta impermeabilización concentrada.

El descenso en el camino del coronamiento fue de unos 3 metros en la parte central del muro y se observa además una fina grieta al pié del talud de aguas abajo. La reparación de este tranque puede consistir en recuperar el muro antiguo retirando el material suelto y volverlo a colocar bien compactado o rehacer el total del muro con un diseño nuevo que involucre incluir un corazón de arcilla y tender ambos taludes.

Además conviene analizar el colocar en el paramento de aguas arriba un enrocado más fino en su parte superior y/o dar peso al pié con un enrocado más pesado o un escalón que de un gran peso al pié de modo de ayudar a impedir la formación del deslizamiento tipo cuchara. Cabe destacar que además se debe considerar la construcción de una nueva torre de toma la que está desestabilizada en un ángulo de unos 15 a 20° respecto de la vertical. Se estima un costo de reparación de unos \$2.000.000.000.

▪ **Tranque La Ariana.**

Es un tranque pequeño (2,2 há de superficie) que se encuentra embancado y no tiene daños. Está ubicado en Rengo.

▪ **Embalses Pailimo I (Cocauquén) y Pailimo II (Piedras Blancas).**

Se ubican en la comuna de Marchigüe.

- ✓ El Pailimo I tiene un muro de:
  - Longitud: 360 m
  - Ancho coronamiento: 4,4 m
  - Altura mayor: 15 m
  - Talud aguas arriba: 2:1 (H:V)
  - Talud aguas abajo: 1,7:1 (H/V)
  
- ✓ El Pailimo II tiene un muro de:
  - Longitud: 200 m
  - Ancho coronamiento: 5 m
  - Altura mayor: 4,5 m
  - Talud aguas arriba: 2:1 (H:V)
  - Talud aguas abajo: 2:1 (H/V)

Son embalses pequeños y su único daño fueron grietas longitudinales en su coronamiento. Su reparación debe consistir en retiro y recolocación de unos 1,5 metros de profundidad en su coronamiento.

**Estado de embalses no visitados.**

▪ **Embalse Los Cristales.**

De acuerdo con lo informado por el Administrador del Embalse, Sr. Francisco Poblete (9 845 69 39), el embalse no presenta grietas en su muro. Este muro fue diseñado con corazón de asfalto.



El camino de acceso quedó con muchos derrumbes y sólo se puede llegar después de 5 horas a caballo.

Es un embalse de 8.500.000 m<sup>3</sup> de capacidad, pero que actualmente por los derrumbes que ha habido de los cerros que lo rodean seguramente se ha visto mermada dicha capacidad.

El único cambio que han notado los celadores es el aumento en una filtración ubicada debajo de la tubería en el tapón de acceso y antes de la válvula de mariposa.

▪ **Embalse Lolol.**

Se ubica en la comuna de Lolol y tiene un muro de:

- Longitud: 200 m
- Ancho coronamiento: 6 m
- Altura mayor: 29 m
- Talud aguas arriba: 2,5:1 (H:V)
- Talud aguas abajo: 3:1 (H/V)

Ante la imposibilidad de visitar el embalse, dado que el camino quedó inhabilitado por derrumbes de tierra, sólo se pudo ver fotos tomadas después del terremoto y lo visto por el Director Regional don Luis Muñoz y don Luis Jara y lo conversado con el Presidente de los regantes don Jaime Mujica Ihnen, se pudo determinar los daños del muro y que consisten en grietas del coronamiento y deslizamiento tipo cuchara del paramento de aguas arriba. Existe un informe que preparó don Donaldo Astorga a la DGA del cual el autor declara no tengo copia.

Del acercamiento que se hizo al descenso que se produjo por el deslizamiento del tipo cuchara, se podría indicar que es de unos 50 a 70 centímetros. No se aprecia el abombamiento del material al pie dado que está bajo agua.

A grosso modo se estima un costo de reparación de \$ 1.100.000.000.

### **Informe Inspecciones Post –Terremoto Febrero 2010.**

El plan de acción DGA en caso de sismos, considera la inspección de embalses, para lo cual se iniciaron las inspecciones el día sábado 06 y domingo 07 de Marzo de 2010.

La visita de los embalses se basó en el Catastro General de Embalses con Mayor Riesgo de la Región de O'Higgins considerados con prioridad N°1 y fueron los siguientes:

1. Embalse La Esmeralda
2. Embalse Rinconada
3. Embalse Idahue
4. Embalse La Gloria
5. Embalse San José de Las Pataguas
6. Embalse Picarquín
7. Embalse Millahue
8. Embalse Patagüilla

A continuación se detalla el estado de cada uno de los embalses señalados, después del terremoto del 27 de febrero de 2010.

### **Daños evidenciados preliminarmente por la DGA regional por efecto del terremoto 2010.**

#### **EMBALSE LA GLORIA.**

Comuna: Pumanque.

Provincia: Colchagua

Cuenca : Nilahue

Subcuenca: Estero Pumanque

Fuente: Quebrada La Gloria.

Capacidad máxima: 0,55 (Millones de m<sup>3</sup>)

Año de Construcción: 1982

Uso: Riego.

Altura de muro: 5.73 m

Ancho del coronamiento : 2.00 m

Largo del coronamiento : 267.70 m

Nombre del Propietario Responsable Legal: Sucesión Demetrio González F.

Coordenadas de ubicación en UTM (m); N: 6.168.500 E: 255.500 Datum Psad 1956

Visita a terreno:

Personal profesional de la Dirección Regional de Aguas realizó una inspección técnica el 06 de

Marzo de 2010, donde se observó lo que a continuación se señala;

- Volumen Acumulado: Se estima entre un 40% y un 50% de su capacidad máxima de llenado.
- Talud exterior: No se observaron fisuras como tampoco grietas.
- Talud interior: En regular estado, en algunos puntos se produjeron desplazamientos (ver Foto 3.).
- En el coronamiento, se visualizaron fisuras y grietas longitudinales en todo el largo del muro, con anchos de 1 a 5 cm con profundidades desconocidas. No hay asentamientos.(Ver Foto 4.)
- Vertedero no sufrió daños (ver Foto 5.).
- Según lo indicado por el administrador, la válvula de descarga no presentó problemas después de prueba de funcionamiento a raíz del terremoto.



Foto 1. Cuenca aportante al embalse La Gloria.



Foto 2. Coronamiento y talud interno.



Foto 3. Desplazamiento del Talud interno.



Foto 4. Daños en el Coronamiento del Muro.





Foto 5. Vertedero de seguridad sin daños.



Foto 6. Potrereros regados con el embalse, al fondo de la localidad de Pumanque.

### **EMBALSE PATAGUILLA.**

- Comuna: Lolol
- Provincia: Colchagua.
- Cuenca: Nilahue.
- Subcuenca: Estero Nilahue.
- Fuente: Quebrada El Molino.
- Capacidad máxima: 0,45 (Millones de m<sup>3</sup>).
- Año de Construcción: 1940.
- Uso: Riego.
- Altura de muro: 12.67 m
- Ancho del coronamiento: 3.6 m
- Largo del coronamiento: 200 m

Nombre del Propietario Responsable Legal: Margarita Oñat Luksic.

Coordenadas de ubicación en UTM (m); N: 6.141.800 E: 257.400 Datum Psad 1956.

Visita a terreno:

Personal profesional de la Dirección Regional de Aguas realizó una inspección técnica el 06 de Marzo de 2010, donde se observó lo que a continuación se señala;

- Volumen Acumulado: Se estima entre un 30% aproximadamente de su capacidad máxima de llenado.
- Talud exterior: No se observaron fisuras como tampoco grietas. (ver Foto 1.).
- Talud interior: En mal estado, en todo el talud interno se observan desplazamientos de tierra y grietas longitudinales (ver Foto 2. y foto 3.).
- En el coronamiento, se visualizaron fisuras y grietas en el centro del muro con anchos de 1 a 5 cm. con profundidades entre 4 cm a 25 cm de profundidad. No se presentaron sentamientos diferenciales (Foto 5).
- El Vertedero sufrió daños presentando grietas y desmoronamiento de parte de él, además el Umbral del vertedero esta peraltado con sacos de tierra (Foto 4.).
- Según lo observado no existe válvula de descarga, además los lugareños indicaron que el embalse no se utiliza hace más de dos años.





Foto 1. Talud externo y cuenca aportante.



Foto 2. Talud interno se presenta con desplazamiento y grietas.

3a)



3b)



3c)



3d)



Fotos 3. Talud interno presenta grietas de 0,4 metros a 1,2 metros de profundidad en todo el largo del Talud.



Foto 4. Vertedero de seguridad con Grietas y desprendimiento de material.





Foto 5. Grieta en el coronamiento del muro.

### **EMBALSE IDAHUE.**

- Comuna: San Vicente de Tagua Tagua.
- Provincia: Cachapoal.
- Cuenca: Rapel.
- Subcuenca: Estero Zamorano.
- Fuente: Quebrada S/N (Laguna de Tagua Tagua).
- Capacidad máxima: 1,02 (Millones de m<sup>3</sup>).
- Año de Construcción: 1930.
- Uso: Riego.
- Altura Muro: 6,89 m.
- Ancho Coronamiento: 2,50 m.
- Largo Coronamiento: 1,2 Km.

Nombre del Propietario Responsable Legal: Comunidad IDAHUE

Coordenadas de ubicación en UTM (m); N: 6.183.400 E: 298.200 Datum Psad 1956

Visita a terreno:

Personal profesional de la Dirección Regional de Aguas realizó una inspección técnica el 07 de Marzo de 2010, donde se observó lo que a continuación se señala;

- Volumen Acumulado: Se estima entre un 20% aproximadamente de su capacidad máxima de llenado.
- Talud exterior: No se observaron fisuras como tampoco grietas.
- Talud interior: No se observaron fisuras como tampoco grietas. (ver Foto 1.).
- En el coronamiento, se visualizaron fisuras y grietas longitudinales discontinuas en el centro del muro con anchos de 5 a 10 cm. con profundidades entre 30 cm a 40 cm de profundidad. No se presentaron asentamientos diferenciales que pudieran disminuir la revancha (Foto 3.).
- El Vertedero de seguridad no sufrió daños.
- Según lo indicado por el administrador Sergio Meneses Yáñez la válvula de descarga no presentó problemas después de prueba de funcionamiento a raíz del terremoto.
- Torre de toma sin daño (Foto 2.).



Foto 1. Talud interior y cuenca aportante





Foto 2. Torre de Toma sin daños, embalse y cuenca aportante.



Foto 3. Grieta Longitudinal en coronamiento del Embalse IDAHUE

## EMBALSE MILLAHUE.

- Comuna: San Vicente de Tagua Tagua.
- Provincia: Cachapoal.
- Cuenca: Rapel.
- Subcuenca: Rio Cachapoal.
- Fuente: Quebrada Los Alazanes.
- Capacidad máxima: 3,2 (Millones de m3).
- Año de Construcción: 1954.
- Uso: Riego.
- Altura Muro: 11,88 m.
- Ancho Coronamiento: 7,0 m.
- Largo Coronamiento: 645 m.

Nombre del Propietario Responsable Legal: Parcelas Ex Hacienda Millahue.

Coordenadas de ubicación en UTM (m); N: 6.175.750 E: 295.500 Datum Psad 1956.

Visita a terreno:

Personal profesional de la Dirección Regional de Aguas realizó una inspección técnica el 07 de marzo de 2010, donde se observó lo que a continuación se señala:

- Volumen Acumulado: Se estima un 30% aproximadamente de su capacidad máxima de llenado.
- Talud exterior: Destrucción parcial de un 40% y desplazamiento de material (ver Foto 2.)
- Talud interior: Desplazamiento y destrucción de un 60% (Foto 6.).
- En el coronamiento: Destrucción del 70% producto del terremoto, se visualizaron grietas longitudinales en todo el largo, con profundidades de 4 metros a 6 metros. Existencia de asentamiento diferencial en el muro (Foto 3. y Foto 4.).
- La Torre de Toma: sufrió desplazamiento y se encuentra inclinada hacia el embalse (Foto 7. y Foto 8.).





Foto 1. Embalse y cuenca aportante.



Foto 2. Deslizamiento de material de Coronamiento y del Talud exterior.



Foto 3. Destrucción del Muro después del terremoto.



Foto 4. Grieta Longitudinal en coronamiento del Embalse MILLAHUE.





Foto 5. Grietas Longitudinales en coronamiento del Embalse MILLAHUE



Foto 6. Deslizamiento de material de Coronamiento y del Talud interior.





Foto 7. Inclinación de La Torre de Toma hacia el embalse.



Foto 8. Desplazamiento de la Torre de Toma.

## EMBALSE SAN JOSE DE LAS PATAGUAS.

- Comuna: San Vicente de Tagua Tagua.
- Provincia: Cachapoal.
- Cuenca: Rapel.
- Subcuenca: Rio Cachapoal.
- Fuente: Quebrada El Durazno.
- Capacidad máxima: 2,6 (Millones de m3).
- Año de Construcción: 1961.
- Uso: Riego.
- Altura Muro: 10,45 m.
- Ancho Coronamiento: 5,0 m.
- Largo Coronamiento: 627 m.

Nombre del Propietario Responsable Legal: Sebastián Correa Muzard.

Coordenadas de ubicación en UTM (m); N: 6.177.200 E: 301.450 Datum Psad 1956.

Visita a terreno:

Personal profesional de la Dirección Regional de Aguas realizó una inspección técnica el 07 de Marzo de 2010, donde se observó lo que a continuación se señala:

- Volumen Acumulado: Se estima entre un 30% aproximadamente de su capacidad máxima de llenado.
- Talud exterior: Se observaron desplazamiento de material y grietas. (ver Foto 1.).
- Talud interior: En regular estado, en todo el talud interno se observan desplazamientos de tierra (ver Foto 2.).
- En el coronamiento, se visualizaron fisuras y grietas longitudinales en todo el largo con anchos de 10 a 15 cm. con profundidades entre 4 a 25 cm, y remoción de material. Además se presentaron asentamientos discontinuos (Fotos 3., 4. y 5.)
- El Vertedero no sufrió daños.
- Torre de toma sin daños (Foto 6.).





Foto 1. Cuenca aportante embalse San José de las Pataguas.



Foto 2. Desplazamiento de material en talud interior.



Foto 3. Grieta en el coronamiento.





Foto 4. Grieta en coronamiento.



Foto 5. Grieta en coronamiento.





Foto 6. Torre de toma sin daños.



Foto 7. Vertedero de seguridad sin daño.

## **EMBALSE PICARQUÍN.**

- Comuna: Mostazal.
- Provincia: Cachapoal.
- Cuenca: Maipo.
- Subcuenca: Río Angostura .
- Fuente: Estero Picarquín.
- Capacidad máxima: 1,30 (Millones de m3).
- Año de Construcción: 1945
- Uso: Riego.
- Altura de muro: 18.06 m.
- Ancho del coronamiento: 2.50 m.
- Largo del coronamiento: 540 m.

Nombre del Propietario Responsable Legal: Comunidad Embalse Picarquín, John Botto.

Coordenadas de ubicación en UTM (m); N: 6.239.560 E: 350.100 Datum Psad 1956

Visita a terreno:

Personal profesional de la Dirección Regional de Aguas realizó una inspección técnica el 06 y 07 de Marzo de 2010, donde se observó lo que a continuación se señala;

- Volumen Acumulado: Se estima entre un 5% y un 10% de su capacidad máxima de llenado (Foto 1. y Foto 2.)
- Talud exterior: Se observó una grieta de 2 a 3 de cm. de ancho con 5 a 8 m. de largo (Foto 3.).
- Talud interior: : No se observaron fisuras como tampoco grietas
- En el coronamiento, se visualizaron dos fisuras del muro con anchos de 2 a 4 cm. con profundidades desconocidas (foto 4.). No hay asentamientos.
- Vertedero no sufrió daños (Foto 5.).
- Según lo indicado por el administrador don Manuel Osorio Silva, Jefe de Sector Picarquín de AGROSUPER, no se observaron daños.





Foto 1. Volumen acumulado Embalse Picarquín.



Foto 2. Volumen acumulado.

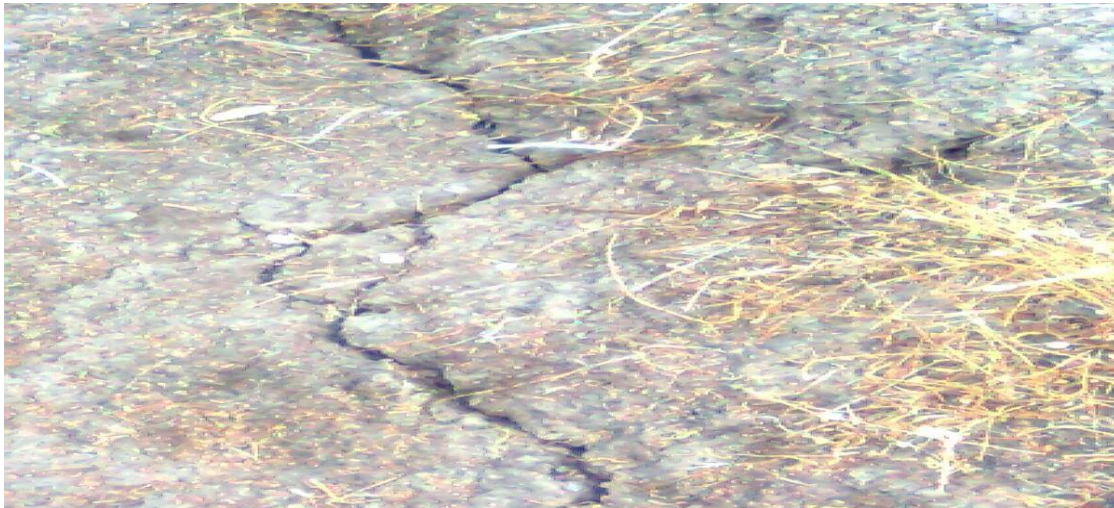


Foto 3. Grieta muro exterior.



Foto 4. Grieta coronamiento.





Foto 5. Vertedero.

### **EMBALSE ESMERALDA.**

- Comuna: Quinta de Tilcoco.
- Provincia: Cachapoal.
- Cuenca: Rapel.
- Subcuenca: Río Cachapoal.
- Fuente : Río Claro de Rengo.
- Capacidad máxima: 0,06 (Millones de m3).
- Año de Construcción: 1962.
- Uso: Riego.
- Altura de muro: 3.29 m.
- Ancho del coronamiento: 1.50 m.
- Largo del coronamiento: 795 m.

Nombre del Propietario Responsable Legal: Comunidad Esmeralda, Raúl Gálvez (Administrador).

Coordenadas de ubicación en UTM (m); N: 6.199.100 E: 325.600 Datum Psad 1956.

**Visita a terreno:**

Personal profesional de la Dirección Regional de Aguas realizó una inspección técnica el 06 y 07 de marzo de 2010, donde se observó lo que a continuación se señala;

- **Volumen Acumulado:** Se encuentra seco casi en su totalidad, el agua apozada sólo sirve para bebida de aves. Al momento del terremoto se encontraba con un 70% de su capacidad pero fue vaciado por precaución luego del sismo, según lo señalado por el Administrador. (Foto 1.)
- **Talud exterior:** No se observaron grietas, sin embargo existen dos zonas húmedas que se deben a pequeñas filtraciones en el lado sur, que según el Administrador existían con anterioridad al terremoto.
- **Talud interior:** No se observaron fisuras como tampoco grietas
- **En el coronamiento,** No se observaron fisuras ni grietas (Foto 2.).
- **Vertedero** no sufrió daños visibles (Fotos 3. y 4.).



Foto 1. Volumen acumulado y talud interior.



Foto 2. Coronamiento del muro sin daños.



Foto 3. Obra de evacuación y entrega.





Foto 4. Compuerta.

#### **EMBALSE RINCONADA.**

- Comuna: Chimbarongo.
- Provincia: Colchagua.
- Cuenca: Rapel.
- Subcuenca: Río Tinguiririca.
- Fuente : Río Tinguiririca.
- Capacidad máxima: 0,04 (Millones de m3).
- Año de Construcción: 1950.
- Uso: Riego.
- Altura de muro: 3.59 m.
- Ancho del coronamiento: 2.00 m.
- Largo del coronamiento: 530 m.

Nombre del Propietario Responsable Legal: Comunidad Santa Isabel, Fundo Rinconada.

Coordenadas de ubicación en UTM (m); N: 6.161.400 E: 324.000 Datum Psad 1956.

Visita a terreno:

Personal profesional de la Dirección Regional de Aguas realizó una inspección técnica el 06 de Marzo de 2010. No fue posible ingresar debido a que el Sr. Ángel Adasme, guardia de la puerta de acceso del Fundo, señaló que no tiene autorización para permitir el ingreso y sólo el administrador pueda dar la autorización el que no estaba ubicable por ser fin de semana. Quedó constancia en el libro diario del Fundo de la visita de la DGA.

## 6.6 Bibliografía.

- Ackerman, C.T., 2009. HEC-GeoRAS. GIS Tool for support of HEC-RAS using ArcGIS1:User Manual. US Army Corps of Engineers, Hydraulic Engineering Center (USACE HEC), Davis, CA, 246 pp.
- Acuña, E. 2010. Documento técnico: "Informe de cometido funcional". Ministerio de Obras Públicas.
- DGA. 2010. Documento técnico: "Informe Inspecciones Post – Terremoto Febrero 2010" Ministerio de Obras Públicas.
- Diario el Día, 2012. Colapso de estanque de agua provoca un aluvión y deja ocho familias damnificadas. <http://www.diarioeldia.cl/articulo/colapso-estanque-agua-provoca-un-aluvion-deja-ocho-familias-damnificadas>
- R.E.G. Ingenieros Consultores Ltda. 2010. Catastro de embalses ubicados entre las regiones de Valparaíso y la Araucanía. Informe final elaborado para la Unidad de Fiscalización de la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas.
- Yi, S. 1998. The World's most catastrophic dam failures—The August 1975 collapse of the China's Yangtze River and its people: New York, M.E. Sharpe, p. 25-38.

## **7. AMENAZA DE INCENDIO FORESTAL.**

### **7.1 Introducción.**

Los incendios forestales son amenazas recurrentes a nivel mundial tanto en zonas vegetadas natural como artificialmente. Los incendios forestales se caracterizan porque pueden afectar grandes superficies en poco tiempo, porque pueden expandirse rápidamente desde su foco de origen, porque pueden cambiar de dirección repentinamente (asociado mayormente a la dirección y velocidad del viento y la topografía) y porque pueden extenderse incluso cruzando áreas sin vegetación como caminos y tierras baldías. Los incendios forestales pueden tener impactos negativos severos en la población y los ecosistemas afectados.

En Chile, los incendios forestales se han incrementado significativamente en las últimas décadas. Esto, a pesar de los esfuerzos gubernamentales y privados por prevenir y controlar estos eventos. Por ejemplo, en la temporada 2002-2003 se registraron alrededor de 7.500 incendios forestales en todo el país. Cifra muy superior a los 1.000 incendios registrados en temporadas anteriores a 1972 (Peña y Palma 2008). En promedio en Chile entre 1964 y 2004 se quemaron por temporada entre 40.000 y 50.000 hectáreas. Siendo el año con un registro más alto de superficie quemada por incendios forestales 1999 con más de 100.000 hectáreas (Peña y Palma 2008).

Los incendios forestales son comunes en Chile especialmente en la región de clima mediterráneo. La ocurrencia de veranos secos prolongados y la presencia de vegetación con alto poder ignitivo hacen de esta región un área susceptible de ser afectada por incendios forestales. La predisposición natural a ser afectada por incendios forestales de esta región se ve acentuada por la acción antrópica, tanto por la plantación de especies con follaje altamente inflamable, como por fuegos iniciados accidental o intencionalmente por la población. De hecho entre 1977 y 2003 un 26.2% de los incendios forestales en el país fueron provocados intencionalmente y la mayoría



de los eventos restantes estuvo relacionado con actividades antrópicas (forestal, agrícola, recreacional etc.) (CONAF 2003).

En este contexto, en este trabajo se analiza la amenaza de incendios forestales presente en La Región del Libertador General Bernardo O'Higgins con el fin de identificar los sistemas estratégicos más susceptibles de ser afectados ante estos eventos.

### **7.1.1 Objetivo.**

El informe tiene como objetivo analizar la amenaza por incendios forestales presente en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins e identificar los Sistemas Estratégicos expuestos a esta amenaza.

## **7.2 Metodología.**

El informe se realizó tomando como base a las directrices metodológicas *ad hoc* elaboradas por la Corporación Nacional Forestal (en adelante CONAF) para la definición de zonas de riesgo provocado por incendios forestales en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. Dicho informe se basa fundamentalmente en registros históricos de incendios (periodo 2008-2012) y en el juicio de expertos. En este sentido cabe destacar que, en estricto rigor, ésta metodología espacializa los riesgos de inicio de incendios forestales en la región en función de 2 componentes principales: a) Amenaza y b) Vulnerabilidad. Siguiendo este esquema, a continuación se detalla de manera secuencial los pasos metodológicos para la obtención de dicha cobertura.

### **7.2.1 Determinación de Variables.**

En primer lugar se identificaron las variables que han estado asociadas a incendios forestales en la última década. Entre éstas se cuentan la presencia de centros poblados, red vial y la presencia de huellas y senderos utilizados por turistas y lugareños cercanos a zonas vulnerables ante incendios. Estas variables, en conjunto con la recurrencia histórica de focos de incendio, ayudaron a definir zonas con distinto

grado de amenaza. Los criterios con que son consideradas estas variables son los siguientes:

### 7.2.1.1 Incendios Forestales Ocurridos y su Influencia.

Esta variable – de síntesis- se la considera como indicadora de un conjunto de otras variables, que al estar presente dan origen a un incendio forestal. Tiene mayor importancia si los eventos se repiten en forma reiterada, pues permiten suponer que las condiciones se están manteniendo en el tiempo (Figura 33.)

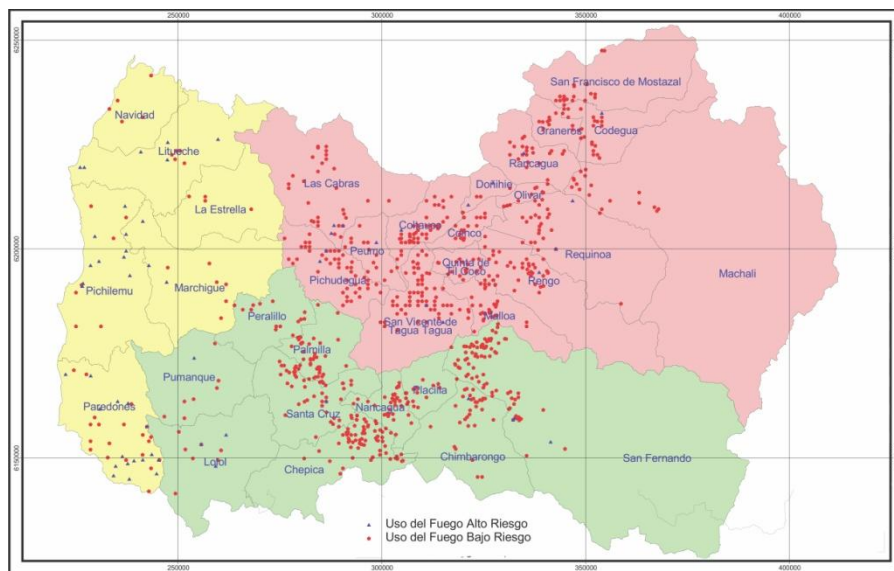


Figura 38. Mapa de focos de incendios forestales de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. Fuente: CONAF 2012.

### 7.2.1.2 Red vial y su Influencia.

Los caminos se asocian a incendios forestales. En relación a esta variable se ha establecido un área de influencia distinta para cada tipo de vía. El criterio seguido se basa en que las vías de mayor importancia, no obstante presentan mayor movimiento de vehículos, poseen una menor actividad humana en sus fajas adyacentes. En cambio en las vías menores, a pesar de presentar un menor movimiento vehicular, las

actividades humanas se ven fuertemente intensificadas, hecho que aumenta la probabilidad de generación de incendios (Figura 34.)

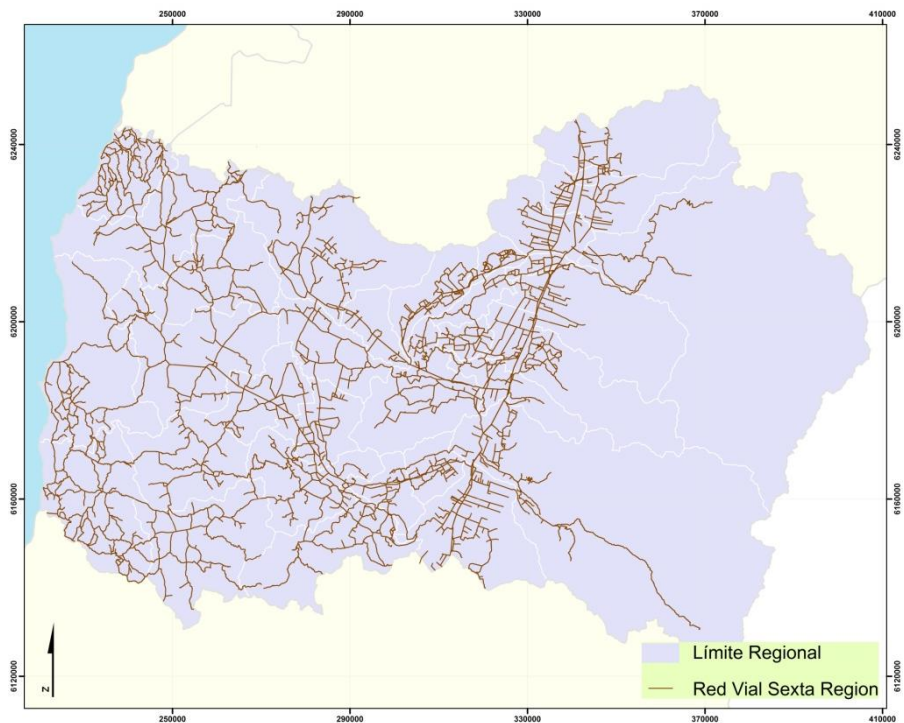


Figura 39. Mapa de Red Vial de La Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. Fuente: MOP.

### 7.2.1.3 Centros Poblados y su Influencia.

El ser humano y las actividades que realiza son el principal origen de los incendios forestales y por ello, la proximidad de núcleos poblados es un parámetro muy relacionado con el riesgo de aparición de incendios. Es necesario por tanto, incorporar esta variable dentro de los análisis del riesgo (Figura 35.).

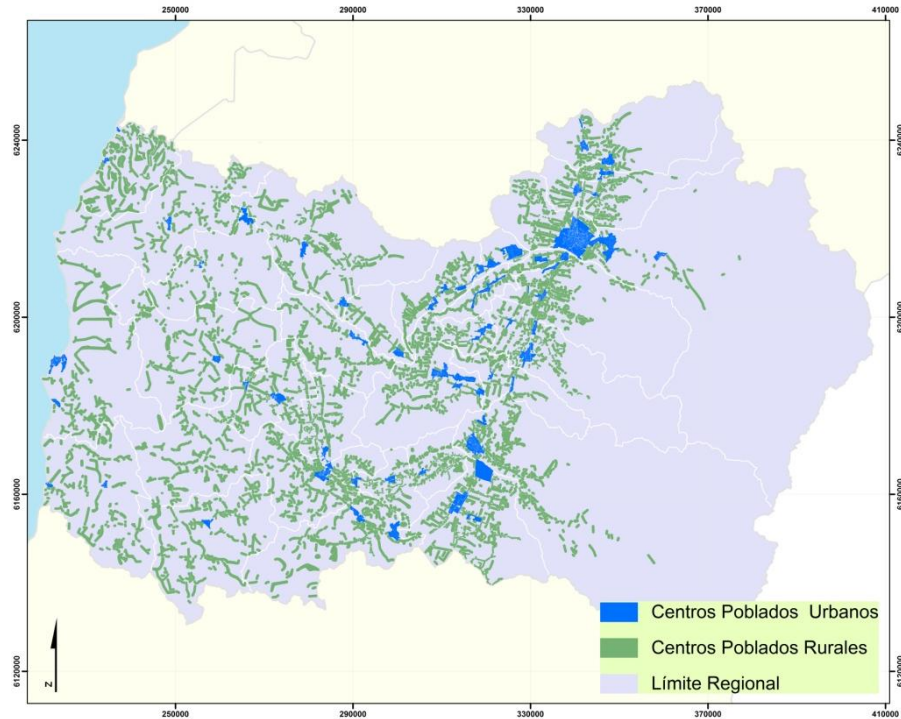


Figura 40. Mapa de Red centros poblados de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. Fuente: Gobierno Regional.

#### 7.2.1.4 Causas Especiales de Incendios Forestales.

Si se observan las causas de incendios forestales en la región, existen algunas reiteradas con un patrón espacial claro. Entre ellas es posible mencionar a) incendios en territorios de tránsito de arrieros; b) territorios con faenas ilegales de quema y c) territorios con actividades turísticas que han generado en forma reiterada incendios forestales<sup>10</sup>.

Una vez identificadas las amenazas, se analizó la vulnerabilidad del territorio regional ante incendios forestales. CONAF definió diferentes grados de vulnerabilidad acorde con la presencia de Áreas Silvestres Protegidas (en adelante ASP) y otras áreas con

<sup>10</sup> Dicha cobertura no se encuentra disponible en la documentación recibida por parte de CONAF



vegetación susceptibles de ser afectadas por incendios. Entre éstas se cuenta el Centro Experimental Forestal Tanumé y sitios prioritarios para la conservación de la naturaleza.

Tanto la información de las amenazas como de la vulnerabilidad ante incendios forestales fue expresada espacialmente asignándose distintas áreas de influencia a cada variable.

A continuación se detallan los criterios utilizados para definir dichas áreas:

Área de influencia de amenazas de incendio forestal.

Para la determinación de las áreas de amenaza por incendios forestales, se utilizaron 4 coberturas, cuyas especificaciones técnicas se señalan a continuación:

- a) Incendios forestales ocurridos y su influencia: se utilizó un *buffer* fijo de 2 km., además de los registros de incendios ocurridos entre 2008 y 2012<sup>1</sup>.
- b) Red vial y su influencia: se utilizaron distintos *buffers*. En Ruta 5 Sur: 100 m., en otros caminos pavimentados: 200 m y en los restantes: 300 m. para ambos lados del eje de cada vía (Figura 36.).

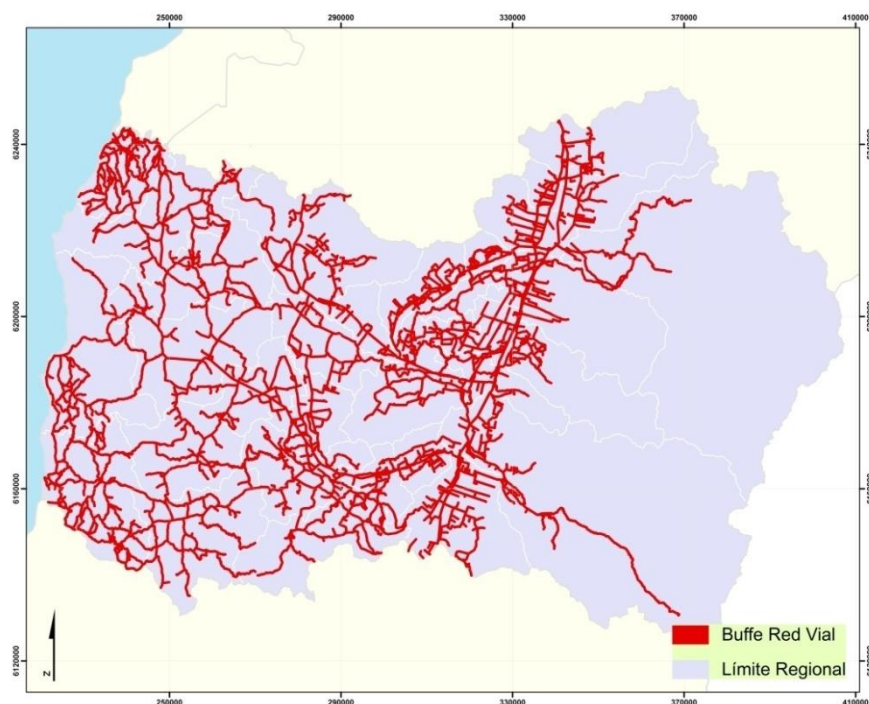


Figura 41. Mapa del Buffer realizado a Red Vial de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins en el contexto de la evaluación del riesgo por incendios forestales. Fuente: CONAF, 2012.

- c) Centros poblados y su influencia: Se utilizó un buffer variable de acuerdo al tamaño del centro poblado (mayor jerarquía = mayor área de influencia). No obstante, CONAF no especifica ni fundamenta las distancias utilizadas.
- d) Áreas de quema ilegal, turismo y arrieros: Se definieron de acuerdo a la experiencia de profesionales de CONAF<sup>11</sup>

### 7.2.2 Determinación de Áreas de Vulnerabilidad ante Incendios Forestales.

- a) ASP y su influencia: se utilizó un *buffer* fijo de 2 km. en los alrededores de las reservas nacionales Río Cipreses y Loncha.

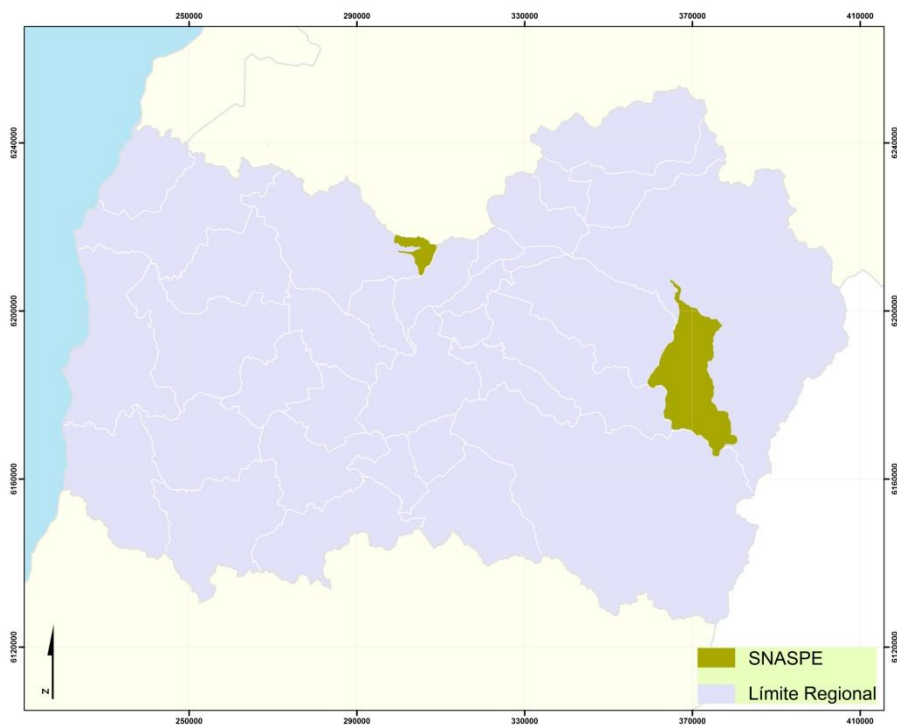


Figura 42. Mapa del Buffer realizado a las Áreas Silvestres Protegidas de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins en el contexto de la evaluación del riesgo por incendios forestales. Fuente: CONAF, 2012.

<sup>11</sup> Dicha cobertura no se encuentra disponible en la documentación recibida por parte de CONAF

- b) Centro Experimental Forestal Tanumé y su influencia: se utilizó un buffer fijo de 2 km. en los alrededores de este centro<sup>11</sup>.
- c) Otros sitios prioritarios: CONAF no menciona el área influencia asignada<sup>11</sup>.
- d) Vegetación susceptible: CONAF no menciona el área de influencia asignada<sup>11</sup>.

Posteriormente para estimar las zonas de riesgo de incendio forestal se analizó en conjunto la información de amenazas y vulnerabilidad. Esto permitió definir de manera cualitativa las zonas con niveles de riesgo alto, medio y bajo.

Finalmente, el mapa de riesgos de incendio forestal elaborado por CONAF fue analizado en conjunto con información cartográfica referente a los sistemas estratégicos regionales (asentamientos humanos, red vial etc.) para identificar las zonas mayormente expuestas a esta amenaza<sup>12</sup>.

## 7.3 Resultados.

### 7.3.1 Distribución de las Zonas con Alto Riesgo de Incendio Forestal.

En la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins existe una superficie total de 655 km<sup>2</sup> de áreas altamente susceptibles de ser afectadas por incendios forestales. De este total 453 km<sup>2</sup> se ubican en la Provincia de Cachapoal, 133 km<sup>2</sup> en la Provincia de Colchagua y 69 km<sup>2</sup> en la Provincia de Cardenal Caro. Estas superficies se ubican mayoritariamente en interfluvios y laderas de las Cordillera de la Costa, en sectores con parches de bosque esclerófilo o plantaciones forestales.

Existen además otras áreas con alto riesgo de incendio forestal en zonas de baja altitud, así por ejemplo, podemos mencionar tanto en las zonas de *pedemot* de la

---

<sup>12</sup> Cabe destacar que la documentación entregada por CONAF no especifica fundamentos que justifiquen la definición de la magnitud de los buffers utilizados, tanto para el área de influencia de amenaza como para la vulnerabilidad ante incendios forestales.

Cordillera de Los Andes, en donde es posible destacar extensas áreas de bosque nativo protegido al interior de la Reserva Nacional Río Cipreses. Por otra parte, en la zona costera destacan zonas de alto riesgo en donde es posible encontrar plantaciones forestales y terrazas costeras que presentan quebradas con presencia de vegetación nativa como es el caso de Pataguilla y Navidad.

Existe un extenso corredor clasificado como de alto riesgo de incendio forestal al norte de Chuchunco y Coltauco, entre otras localidades. Dicho corredor se extiende de noreste a suroeste por aproximadamente 36 kilómetros y tiene un ancho de alrededor de 3 km. Este corredor se desarrolla en estribaciones de la Cordillera de la Costa.

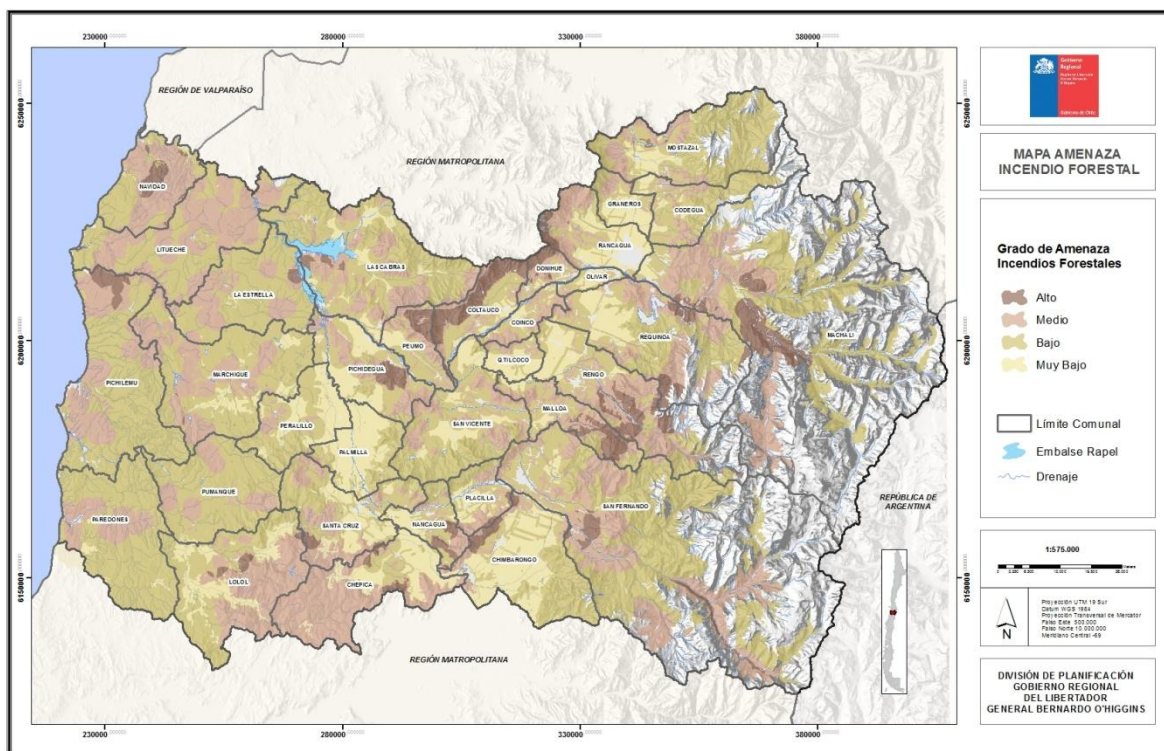


Figura 43. Mapa de Amenaza de Incendios Forestales. Fuente: CONAF, 2012.



### 7.3.2 Identificación de Sistemas Estratégicos Ubicados en Áreas de Alto Riesgo de Incendio Forestal.

Los incendios forestales generan impactos negativos severos en las zonas directamente afectadas por el fuego e impactos negativos indirectos que pueden afectar zonas mucho más amplias. Entre los efectos indirectos y de corto plazo, se encuentran por ejemplo, problemas de visibilidad para el tránsito terrestre y en casos extremos, problemas en el tránsito aéreo. Ciertamente los incendios forestales generan impactos diversos en el sistema natural. Además de la obvia perturbación de los ecosistemas afectados, existen cambios importantes en el sistema de erosión y transporte hídrico, pudiendo generar problemas en obras de infraestructura ribereña distante a varios kilómetros de la cuenca afectada. La sobrecarga de sedimentos se ve facilitada por la abundancia de materiales sueltos y la presencia de suelo desnudo tras el paso del fuego. No obstante los problemas más serios y de largo plazo se producen en los ecosistemas y comunidades afectados directamente por el fuego.

En la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins se cuentan numerosas localidades rurales en los alrededores de áreas con alto riesgo de incendio forestal. Existen sin embargo, otras localidades insertas dentro de dichas áreas. Entre dichos centros poblados se señalan: Bucalemu, Topocalma, Pichidegua y el Manzano. Debido a esto existen algunas instalaciones esenciales y redes vitales que podrían verse afectadas por el fuego, como escuelas rurales y postas de salud. En la Tabla 23., se detallan algunos componentes de sistemas estratégicos que se encuentran insertos en áreas de alto riesgo de incendio forestal.

<b>Sistemas estratégicos en zonas de alto riesgo de incendios forestales</b>					
<b>Provincia.</b>	<b>Asentamientos humanos.</b>	<b>Redes Vitales.</b>	<b>Instalaciones esenciales.</b>	<b>Redes de transporte.</b>	<b>Instalaciones con alto potencial de daños.</b>
Cardenal Caro.	Bucalemu. Topocalma .	Ninguna.	Escuela (Coguil).	Cruce G-880 (Navidad). Cruce I-20 (La Estrella).	Ninguna.



	Entidades rurales.			Cruce G-888.	
Colchagua.	Lolol. Entidades rurales.	Línea de transmisión eléctrica 154kv.	Escuela (Lima).	Cruce Ruta 5 (San Fernando) Termas del Flaco. Cruce I-45 Talcaehue-La Tena. Cruce I-824 (Puquillay).	Ninguna.
Cachapoal	Pichidegua. El Manzano. Entidades rurales.	Línea de transmisión eléctrica 110kv. Subestación eléctrica s/e Sausal. Oleoducto (cercano a Graneros).	Escuela (Chacayes). Escuela (Rinconada de Parral). Avanzada de carabineros Las Leñas. Retén de Carabineros Pangal. Posta de Salud Rural Rinconada de Parral.	Línea Férrea. Cruce H-111 Peuco. Cruce ruta 5 (Gultro) Coya. Cruce Ruta 66 (El Manzano). Cruce H-374. Cruce-H334 Purén. Cruce H-288 (Doñihue). Cruce Ruta 66 (Peumo).	Ninguna.

Tabla 23. Sistemas estratégicos localizados en zonas de alto riesgo de incendio forestal en la Región de O'Higgins. Fuente CSW Consultores Ambientales.

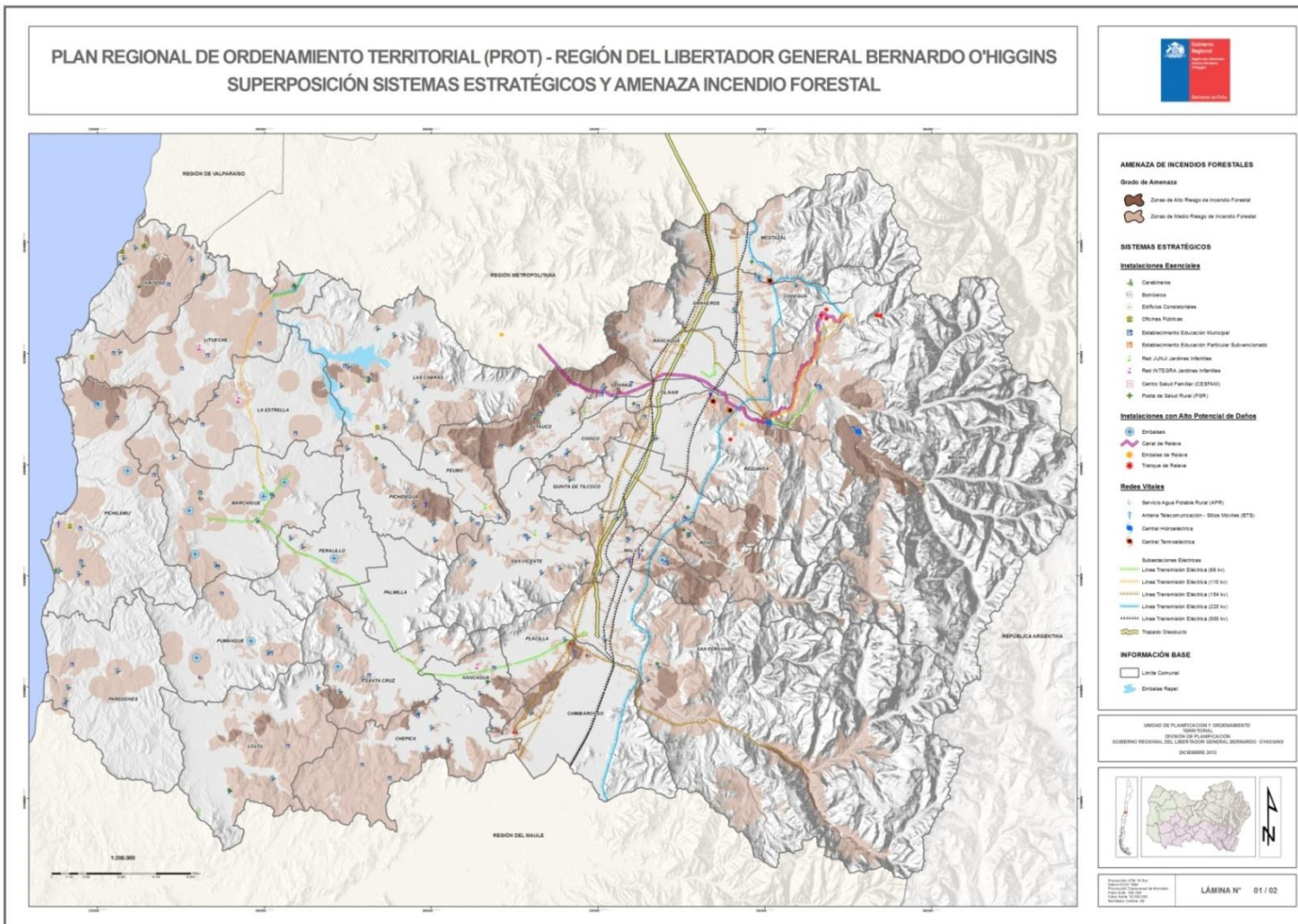


Figura 44. Mapa de Amenaza de Incendios Forestales y Sistemas Estratégicos.(Parte 1) Fuente: Gobierno Regional, 2012.

**plan regional de ordenamiento territorial**  
**COMPONENTE RIESGOS**

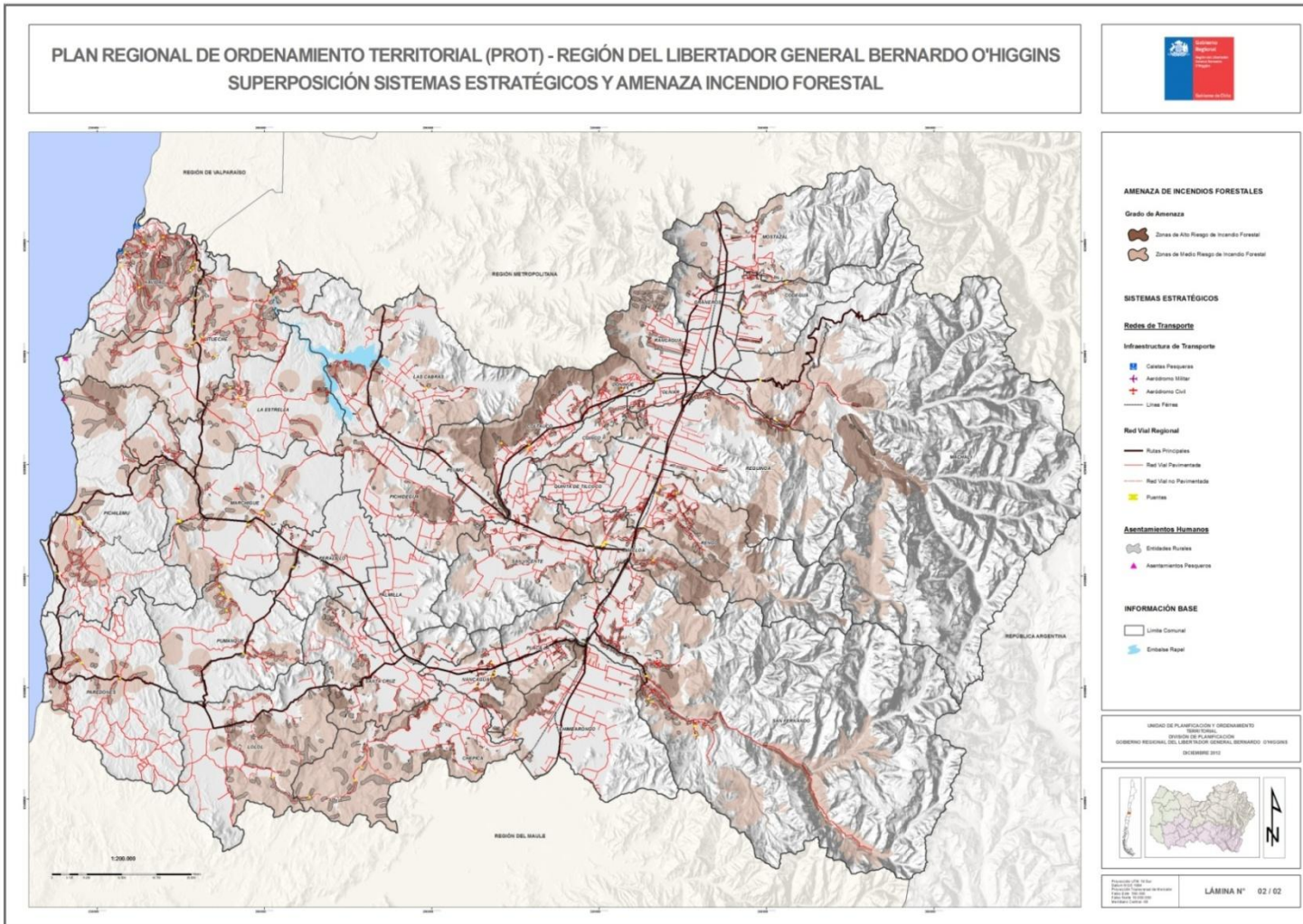


Figura 45. Mapa de Amenaza de Incendios Forestales y Sistemas Estratégicos.(Parte 2) Fuente: Gobierno Regional, 2012.



## 7.4 Conclusiones y Recomendaciones.

Los incendios forestales son una amenaza recurrente en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, debido tanto a condiciones naturales (estación seca prolongada y vegetación altamente combustible), como a la propia acción del hombre. No obstante, la mayoría de las áreas con alto riesgo de incendio forestal se ubican en zonas escasamente pobladas correspondientes a interfluvios y laderas de la Cordillera de la Costa y zonas bajas de la Cordillera de los Andes. A pesar que se definieron zonas con distinto nivel de riesgo de incendio forestal, los incendios generados por acción antrópica pueden afectar áreas sin registros históricos de incendio clasificadas como de bajo riesgo. Esto introduce un grado de incertidumbre en dicha clasificación.

Por otro lado, es recomendable adecuar la metodología para evaluar el riesgo de incendios forestales de tal manera que permita y facilite su actualización periódica. Esto debido a que potenciales cambios en el uso de suelo como la presencia de nuevas plantaciones forestales o su disminución, o el aumento de actividades agrícolas o turísticas cercanas a zonas vulnerables que pueden hacer variar el grado de amenaza, vulnerabilidad y finalmente el riesgo de incendios forestales en un corto periodo de tiempo (meses).

## 7.5 Bibliografía.

- CONAF 2003. Informes finales estadísticos de temporadas. Programa de Manejo del Fuego. Corporación Nacional Forestal. Santiago de Chile.
- CONAF 2012. Método para la determinación de incendios forestales-Región de O'Higgins. Corporación Nacional Forestal. 8 pp.
- Peña-Fernández, E. Valenzuela-Palma, L.2008. Proceeding of the second international symposium on fire economics, planning, and policy: A global view. 549-565.

## **8. AMENAZA DE INUNDACIÓN POR EVENTOS METEOROLÓGICOS.**

### **8.1 Introducción.**

Las inundaciones por eventos meteorológicos son los procesos naturales que con mayor frecuencia generan daños en infraestructura y pérdida de vidas humanas a nivel mundial. Las inundaciones causadas por eventos meteorológicos suelen producirse tanto por precipitaciones intensas o prolongadas o por deshielo acelerado. Las áreas susceptibles de ser inundadas están determinadas básicamente por la topografía (pendiente, rugosidad, etc. permeabilidad del sustrato y la magnitud del evento meteorológico). Cabe destacar que no todas las inundaciones son causadas por eventos meteorológicos extremos y no todos estos eventos causan inundaciones. Esto depende, por ejemplo, de la presencia de obras hidráulicas para el control de crecidas y del mantenimiento de los sistemas de drenaje urbano.

En la zona central de Chile existen registros históricos de inundaciones producidas tanto por precipitaciones intensas y/o prolongadas en invierno (Ortlieb 1994), como por deshielo acelerado en primavera (Garreaud 1993). Las inundaciones en Chile Central han estado frecuentemente asociadas con años Niño en los que la precipitación total anual suele superar el promedio histórico.

En la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins las inundaciones asociadas a eventos meteorológicos son un fenómeno común. Dichos eventos afectan tanto áreas rurales, generando pérdidas en la actividad agrícola, como áreas urbanas alterando el normal funcionamiento de las ciudades. En este caso, un número importante de eventos está asociado a deficiencias en el sistema de drenaje urbano (El Rancagüino, 2012).

En el presente informe se estudia el grado de amenaza que presentan las inundaciones de origen meteorológico en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, analizando registros históricos (siglos XX y XXI) de puntos críticos de inundación. Cabe

destacar que el análisis se basa en registros incompletos por lo que es sólo de carácter indicativo.

### **8.1.1 Objetivo.**

El informe tiene como objetivo evaluar el grado de amenaza que presentan las inundaciones producidas por eventos meteorológicos en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins e identificar las áreas más frecuentemente afectadas por estos eventos.

## **8.2 Metodología.**

En primer lugar, se recolectó información de zonas afectadas históricamente por eventos de inundación, disponible en servicios públicos regionales, tales como la Dirección General de Aguas (en adelante DGA) y la Oficina Nacional de Emergencia Regional (en adelante ONEMI).

La información fue obtenida en formato digital para ser analizada en Sistemas de Información Geográfico. Los datos obtenidos son de carácter puntual, por lo que no se identifican las zonas efectivamente inundadas en cada evento (Figura 38.). La base de datos no especifica información relevante, por ejemplo, la fecha de la inundación o el nivel de agua en cada punto.

Se analizó la base de datos y se comprobó que muchos de los puntos críticos de inundación correspondían a relieves empinados, por lo que la base de datos ha sido corregida eliminando estas incongruencias.

Con los datos de puntos de inundación se realizó un mapa de densidades para identificar de manera espacialmente explícita, aquellas zonas con mayor número de registros. El mapa de densidades se realizó tomando un radio de influencia en cada punto de 1500 m. Este radio es significativamente más amplio que el área realmente afectada por las inundaciones, no obstante, dicha distancia ha sido escogida debido a que optimiza la representación de las categorías de amenaza requeridas, dando así, una idea gruesa de la distribución de los registros de inundación a escala regional.

Posteriormente este mapa fue superpuesto con capas de información de sistemas estratégicos (infraestructura, asentamientos poblados etc.) para identificar las zonas mayormente afectadas por inundaciones. Cabe destacar que debido a las limitaciones de la información base utilizada (se desconoce el área afectada por cada evento de inundación), los resultados del análisis deben ser considerados con cautela.

En el caso del Río Cachapoal, la información antes mencionada fue complementada con las áreas de riesgo de inundación fluvial definidas en el estudio "Estudio de diagnóstico, proposición de defensas fluviales y plan de manejo en el Río Cachapoal. Tramo: puente Ruta 5 hasta las Juntas, Provincia de Cachapoal". Este estudio fue mandatado por MOP – DGA vía licitación pública, la cual fue adjudicada y ejecutada por la empresa IRH Ing. Consultores Ltda. 2010.

Dicho estudio tuvo por objetivo elaborar un diagnóstico de las defensas fluviales existentes y la proposición de obras nuevas para el tramo del río Tinguiririca especificado, a partir de su caracterización hidrogeomorfológica y del análisis y diagnóstico de los factores relacionados con los cauces naturales, entre ellos, las zonas de inundación, las obras de protección fluvial, bocatomas, canales, el uso de los suelos adyacentes y las explotaciones de áridos.

A partir de éste estudio se obtuvieron aquellas coberturas referidas a las zonas de inundación histórica de la caja del río Cachapoal y puntos críticos de inundación del río Tinguiririca, producto de fenómenos meteorológicos y estacionales (Figura 39.).



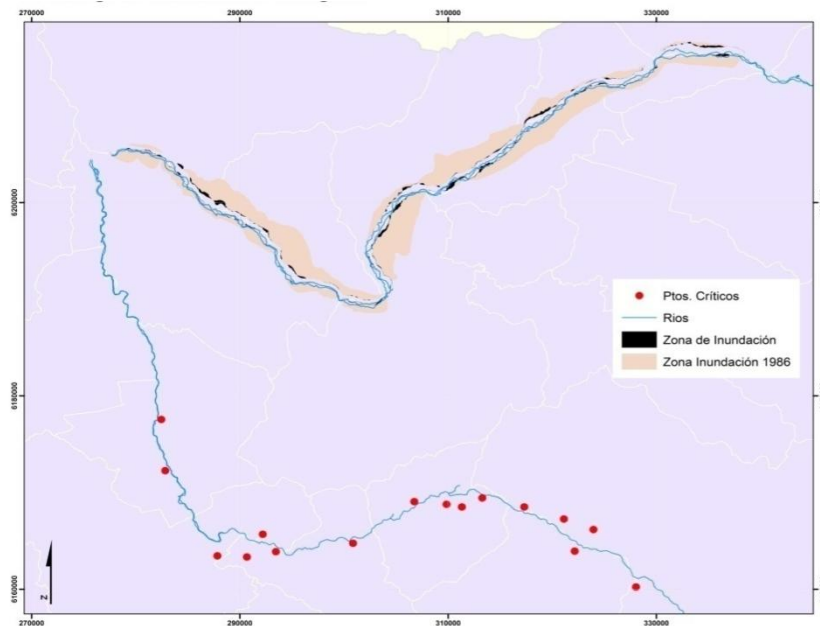


Figura 46. Zonas y Puntos críticos de inundación fluvial de la caja de los ríos Cachapoal y Tinguiririca.  
Fuente: IRH Ing. Consultores Ltda. 2010.

## 8.3 Resultados.

### 8.3.1 Registros de inundaciones en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

La mayor concentración de registros de inundaciones en la región ocurre en la cuenca media del río Tinguiririca. Los puntos críticos de inundación indicados por los organismos regionales, cubren tanto zonas cercanas al lecho actual del río como áreas distantes varios cientos de metros de su lecho de inundación episódico. Los registros de inundación lejanos a los principales cursos hídricos son indicativos de anegamientos por saturación del suelo, en zonas con napa freática superficial o con mal drenaje, o pueden ser también indicativos de inundaciones producidas por desborde de canales. Este tipo de eventos es relativamente frecuente en la región (El Rancagüino, 2012).

Precipitaciones intensas y/o prolongadas son causantes frecuentes de inundaciones en bastas áreas de la región de O'Higgins. Las inundaciones producto del deshielo en

tanto, sólo afectan áreas ribereñas de los principales ríos de la región que tienen superficies importantes de sus cuencas ubicadas sobre la línea de nieves (sobre los 2.000 m.s.n.m).

Cabe señalar, que en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins la inundación que ha tenido mayor significación, en cuanto a pérdida de vidas humanas, ocurrió en la localidad de Olivar, ubicada en la comuna del mismo nombre, probablemente no estuvo asociada a un evento meteorológico. Urrutia y Lanza (1993) señalan que en diciembre de 1847 una gran crecida del río Cachapoal afectó este sector dejando varias víctimas fatales. Esta inundación, así como crecidas presentadas por el río Cachapoal en 1981 (que obligaron a cerrar temporalmente una estación hidroeléctrica, Peña y Klohn 1987), estarían asociadas a represamientos producidos por el avance del Glaciar Cachapoal.

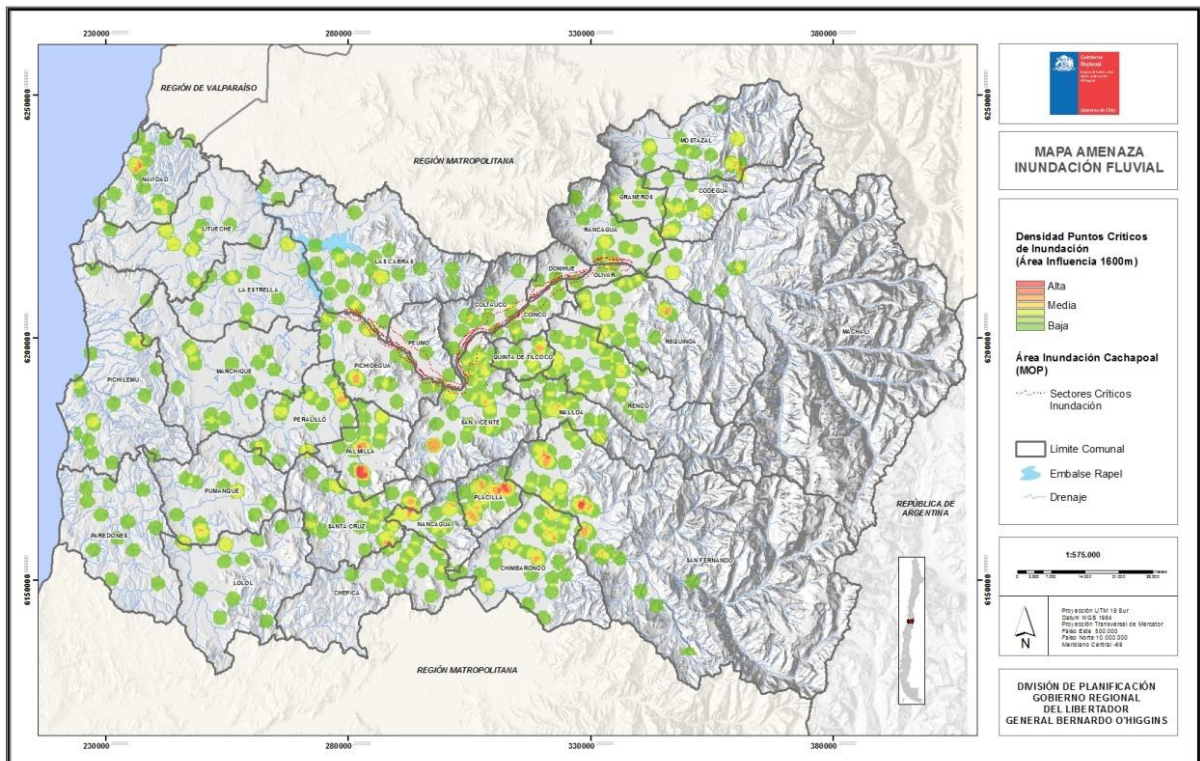


Figura 47. Mapa de Inundación Fluvial. Fuente : Gobierno Regional de O´Higgins, 2012

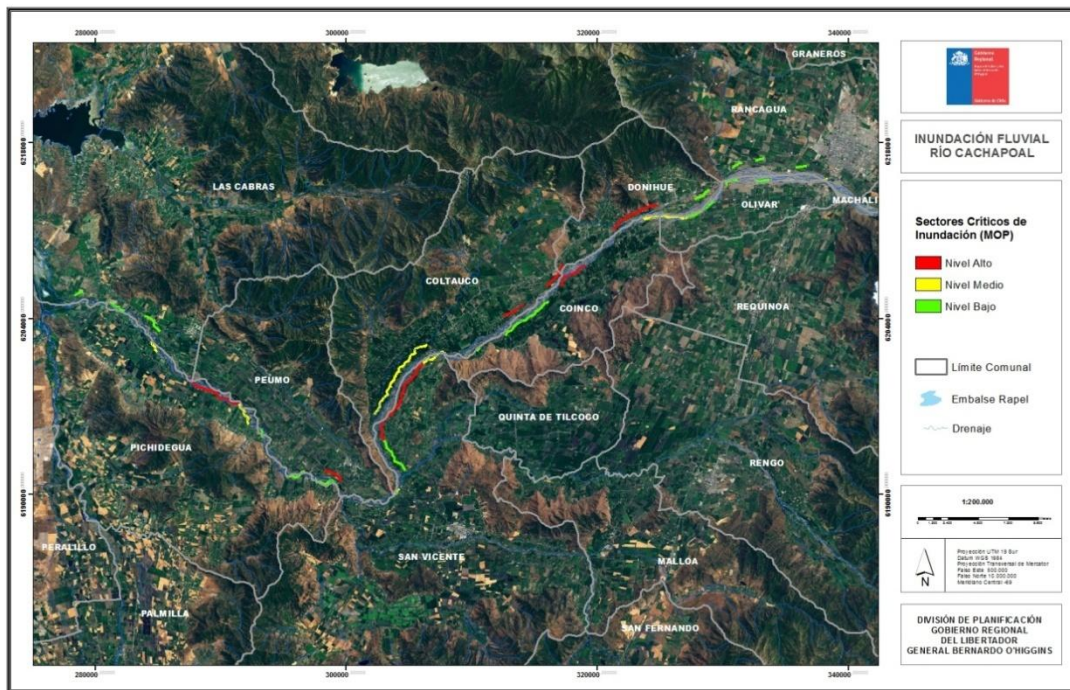


Figura 48. Mapa de Inundación Fluvial. Fuente : MOP.

### 8.3.2 Sistemas Estratégicos en Zonas de Inundación.

Las inundaciones son fenómenos comunes en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins y han afectado numerosas localidades tanto urbanas como rurales. En los mapas que forman parte del estudio se da cuenta de los sistemas estratégicos ubicados en las zonas con mayor número de registros de inundación.

Probablemente muchos de los registros de inundaciones representados en el mapa son producidos por deficiencias en el sistema de drenaje urbano. Las inundaciones suelen provocar problemas temporales de tránsito afectando por ejemplo, pasos bajo nivel y otros componentes de la red vial (El Rancagüino, 2012). Las inundaciones afectan también entidades rurales donde el rebalse de canales es común. Finalmente, la inundación de zonas que alteren directa o indirectamente el normal funcionamiento de las redes de transporte, afectarán inequívocamente el acceso de otros sistemas estratégicos, entre ellos instalaciones esenciales como centros de salud y educacionales.



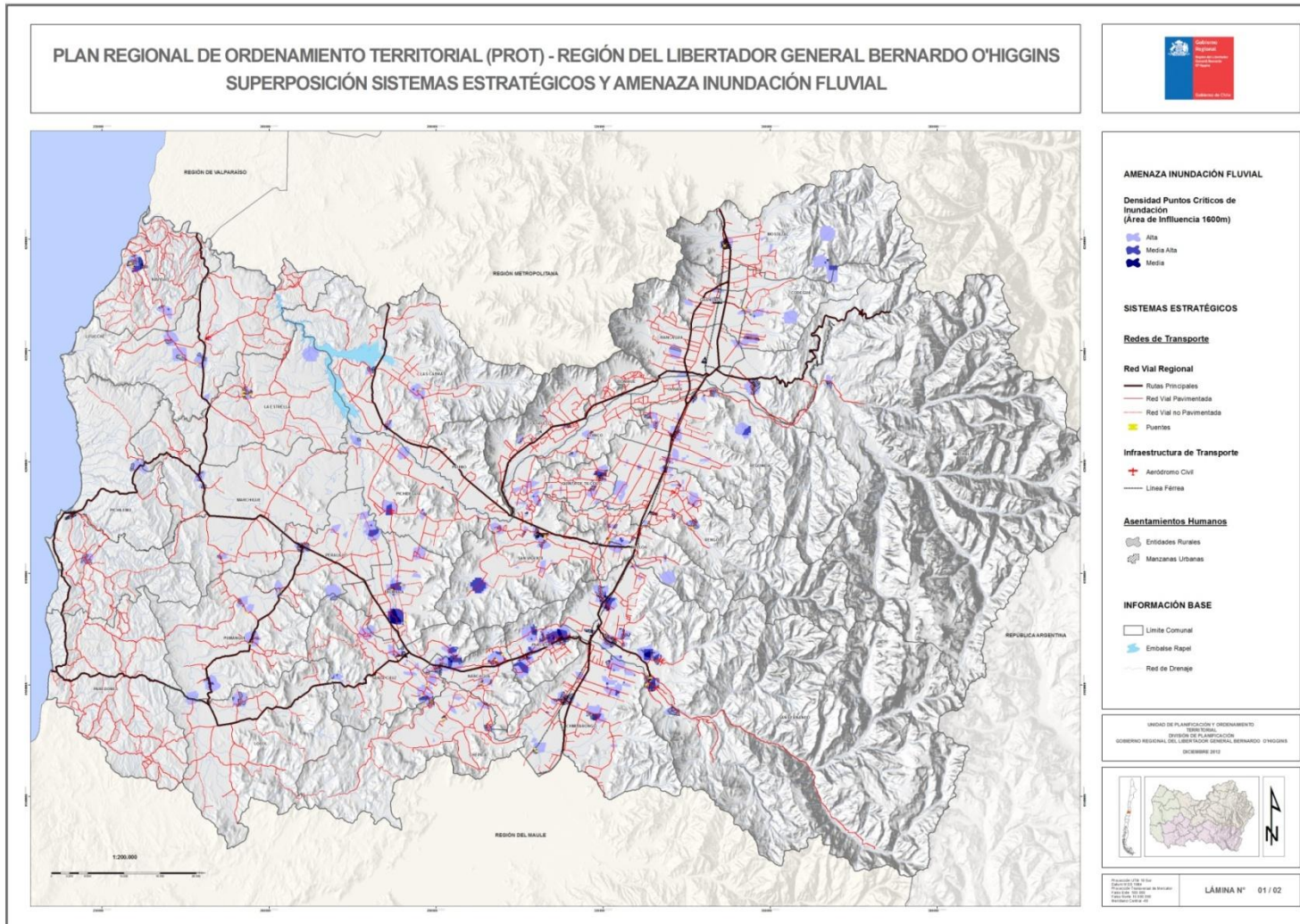


Figura 49. Mapa de Inundación Fluvial y Sistemas Estratégicos. (Parte 1) Fuente: Gobierno Regional de O´Higgins, 2012



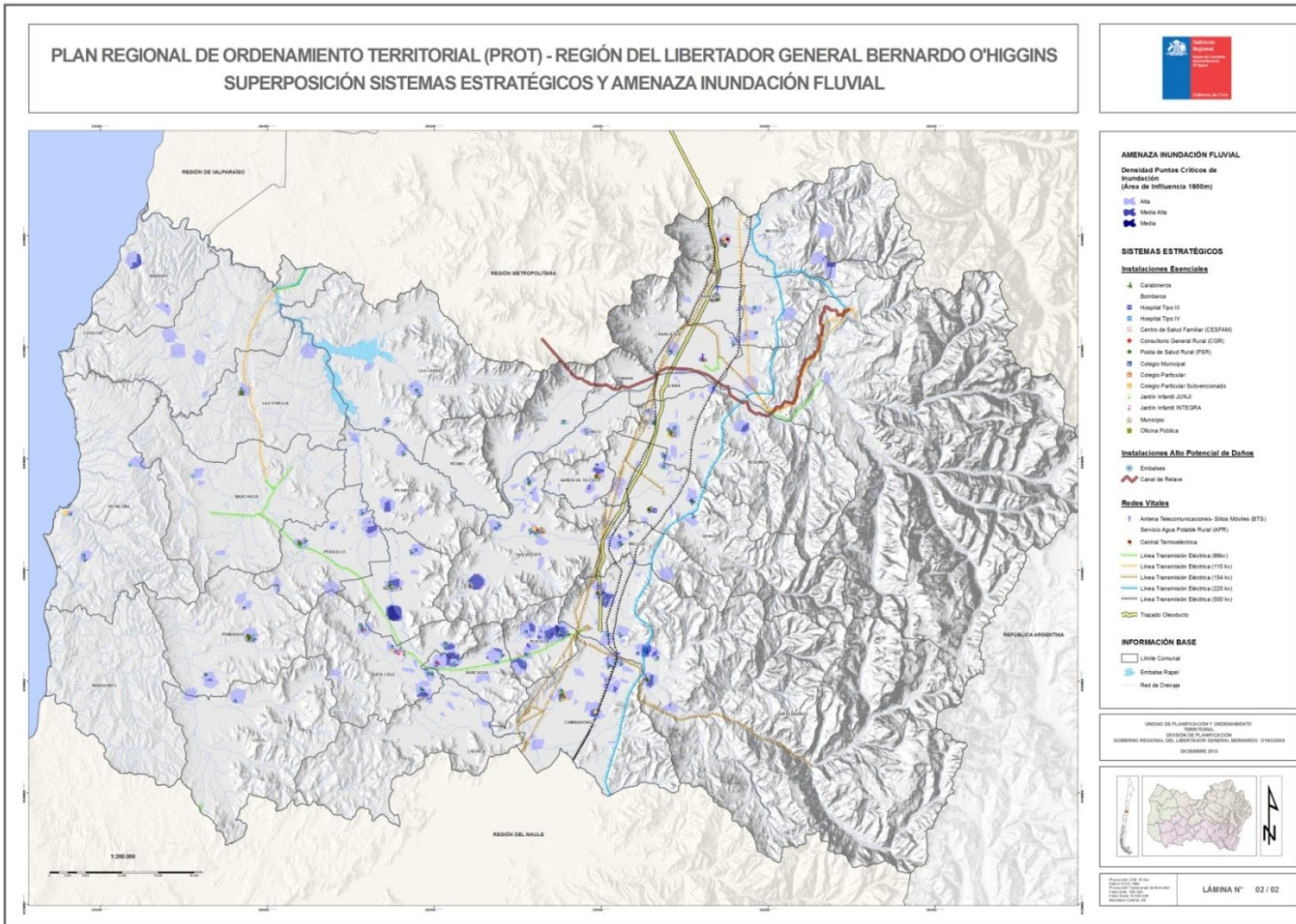


Figura 50. Mapa de Inundación Fluvial y Sistemas Estratégicos. (Parte 2) Fuente: Gobierno Regional de O´Higgins, 2012

## 8.4 Conclusiones y Recomendaciones.

Los registros de inundación (entregados por organismos públicos regionales) indican que la cuenca media del río Tinguiririca es la zona que ha presentado mayor número de anegamientos en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. Precipitaciones intensas y/o prolongadas como el deshielo acelerado en primavera han producido inundaciones en la zona. No obstante, la información básica respecto a cada evento de inundación es incompleta, lo que limita los alcances de éste y posteriores estudios a escala regional.

Para obtener resultados conclusivos respecto a riesgos de inundación, basados en registros históricos, es necesario que la información de cada evento sea colectada de manera sistemática. Datos importantes a considerar son por ejemplo, la altura que alcanzó el agua en cada punto afectado en las diferentes fechas. Esto permitiría asociar las inundaciones con las condiciones meteorológicas que desencadenaron cada evento, identificar los factores condicionantes de la inundación (permeabilidad del sustrato, mantenimiento de sistemas drenaje) y en última instancia, permitiría ajustar o desarrollar sistemas de alerta temprana de inundación.

## 8.5 Bibliografía.

- El Rancagüino.2012. Inundaciones se volvieron a repetir en Rancagua. <http://www.elrancaguino.cl/rancaguino/noticias.php?cod=2638>.
- Garreaud, R.1993. Comportamiento atmosférico asociado a grandes crecidas hidrológicas en Chile Central. Msc Thesis. Universidad de Chile.
- IRH Ing. Consultores Ltda. 2010. Estudio de diagnóstico, proposición de defensas fluviales y plan de manejo en el Río Cachapoal. Tramo: puente ruta 5 hasta las Juntas, Provincia de Cachapoal.
- Ortlieb, L.1994. Las mayores precipitaciones históricas en Chile Central y la cronología de eventos ENOS en los siglos XVI-XIX. Revista Chilena de Historia Natural. 67:463-485.

- Peña, C y Klohn, W.1989. Non-meteorological flood disasters in Chile, en Hydrology of Disasters. Pp 253-258. James and James, London.
- Urrutia, R. y Lanza, C.1993. Catástrofes en Chile, 1541-1992, Santiago: Editorial La Noria.

## 9. AMENAZA DE TSUMANI.

### 9.1 Introducción.

Los tsunamis son olas producidas por el rápido desplazamiento de grandes volúmenes de agua en el mar o en lagos. Entre los factores desencadenantes de tsunamis se cuentan movimientos sísmicos, deslizamientos, erupciones volcánicas, impactos de meteoritos y otros procesos que pueden generar disrupción en la superficie o bajo los cuerpos de agua. Los tsunamis son conocidos por su gran potencial destructivo. Ejemplo de ello son las más de 200.000 víctimas fatales que produjo el tsunami que afectó el sudeste de Asia en diciembre de 2004 (De Silva et al., 2007).

En las costas de Chile, desde el siglo XVI (1562), se han registrado más una centena de tsunamis de origen cercano, de los cuales 35 han tenido efectos destructores (Lagos 2000). El más reciente ocurrió en 2010. En la madrugada del 27 de febrero de 2010, un terremoto de magnitud  $M_w=8.8$  afectó la zona centro sur de Chile generando un tsunami que causó daños diversos en infraestructura a lo largo de 600 km. de costa ( $33^{\circ}36'S-38^{\circ}-28'S$ ) (Marín et al., 2010). Este tsunami generó olas que impactaron zonas elevadas hasta 29 m. sobre el nivel del mar (Fritz et al., 2011) causando más de un centenar de víctimas fatales (El Mercurio, 2010).

Entre las regiones de Chile mayormente afectadas por el terremoto y posterior tsunami se encuentra la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. En esta región, se registraron en total 52 víctimas fatales, de las cuales dos murieron a causa del tsunami (Marín et al., 2010). Los efectos del tsunami fueron diversos en la región variando de acuerdo a la vulnerabilidad de los asentamientos poblados (e.g. tipo de construcción, grado de preparación ante la amenaza) y de acuerdo a la configuración de la línea de costa (e.g. altitud, batimetría, rugosidad del terreno etc.). Por ejemplo, el mar ingresó varias cuadras en la ciudad de Pichilemu y más de 600 m. en el sector de Bucalemu, mientras que otras zonas fueron escasamente afectadas por la inundación.



En este estudio se analiza el riesgo de tsunami en la región y se identifican los sistemas estratégicos (e.g. asentamientos poblados, red vial, servicios públicos) expuestos a esta amenaza. El trabajo se basa en estudios existentes de riesgo de tsunami y se complementa con el análisis de sistemas estratégicos en áreas de riesgo.

### 9.1.1 Objetivo.

El informe tiene como objetivo analizar la amenaza por tsunamis presente en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins e identificar los sistemas estratégicos expuestos a esta amenaza.

## 9.2 Metodología.

El estudio del riesgo de tsunami en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins se basa en el trabajo de la Pontificia Universidad Católica (2010). En dicho trabajo, la evaluación del riesgo de tsunami se realizó considerando los criterios y la metodología detallados a continuación.

La modelación de la amenaza de maremoto, combinó técnicas de modelación numérica y datos observados del reciente tsunami de 2010. Para la modelación numérica de tsunami, se utilizó un terremoto de subducción con parámetro macro-sísmicos del evento del 27 de febrero de 2010 y un deslizamiento uniforme en el plano de falla (Tabla 24.)

1	Longitud, (km..)	450
2	Ancho, (km..)	150
3	Deslizamiento, (m)	10
4	Rumbo, (°)	16.13
5	Echado, (°)	14.84
6	Ángulo, (°)	104
7	Profundidad, (km..)	30
8	Latitud*, (°S)	36.07
9	Longitud*, (°W)	74.08

10	Momento sísmico $M_0$ (Nm)	$1.755 \times 10^{22}$
11	Magnitud $M_w$	8.8

Tabla 24. Parámetro macro - sísmicos utilizados para la modelación numérica de tsunami.  
Fuente: USGS, 2010; Barrientos, 2010.

La modelación del comportamiento del tsunami en el océano, utilizó información batimétrica disponible de baja resolución, simulándose la generación, propagación y determinación de la máxima altura de tsunami esperada en las cercanías de la costa. Estos resultados permitieron focalizar el trabajo de terreno donde se identificaron las máximas alturas de tsunami producidas por el evento de 2010, en todas las localidades en estudio localizadas en la costa de las regiones de O'Higgins y Maule.

Para identificar las alturas del tsunami de 2010 en las localidades afectadas, se entrevistó a sobrevivientes y se localizó los sitios más afectados con el apoyo de fotografías aéreas e imágenes de satélite. La medición de las alturas de tsunami se realizó combinando el uso de estaciones totales, GPS geodésicos y telémetro laser. Las Figuras 40. y 41. muestran ejemplos del levantamiento de información en terreno.



Figura 51. Midiendo con estación total alturas máximas de tsunami en las costas de la ciudad de Constitución, Región del Maule.

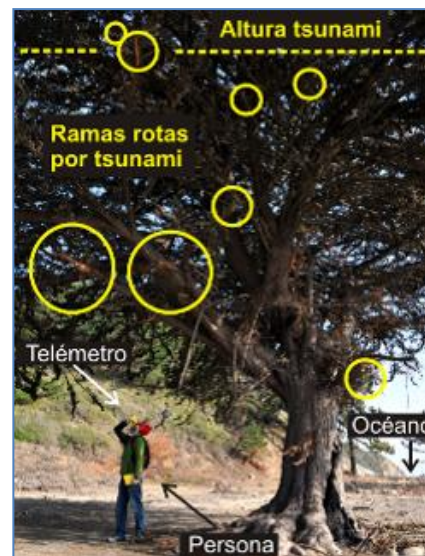


Figura 52. Midiendo con telémetro laser la profundidad de inundación de tsunami en las costas de Topocalma, comuna de Litueche, Región de O'Higgins

Las máximas alturas de tsunami identificadas en las localidades costeras, fueron el input principal para identificar la cota de inundación y espacializar la amenaza de tsunami. Se debe considerar que el tsunami de febrero de 2010, arribó a las costas en la fase de marea baja (ver Figura 42.), por lo que las alturas de ola registradas fueron menores de lo que podrían haber sido en una fase de marea alta. Por lo anterior, de modo de no subestimar la peligrosidad de un tsunami, las alturas de tsunami identificadas en terreno fueron corregidas a la condición de marea del 27 de febrero de 2010, agregándoseles el rango de la marea en sicigias (Se denominan sicigias a las fases de luna llena o nueva). En estos días coinciden la marea solar y marea lunar; debido a que la luna, el sol y la tierra se encuentran en línea recta en la esfera celeste y ponderando el resultado por un factor de incertidumbre de 1.3. El resultado final se traduce en una cota de peligrosidad que diferencia el umbral entre la seguridad y el riesgo.

Como antecedente, la Tabla 25. muestra los rangos de la marea en sicigias en localidades costeras de las regiones de O'Higgins y Maule. El rango máximo se presenta en la Bahía de Topocalma, alcanzando 1,80 m., y el rango mínimo lo posee la Bahía de Curanipe con 1,20 m. (SHOA, 2003).

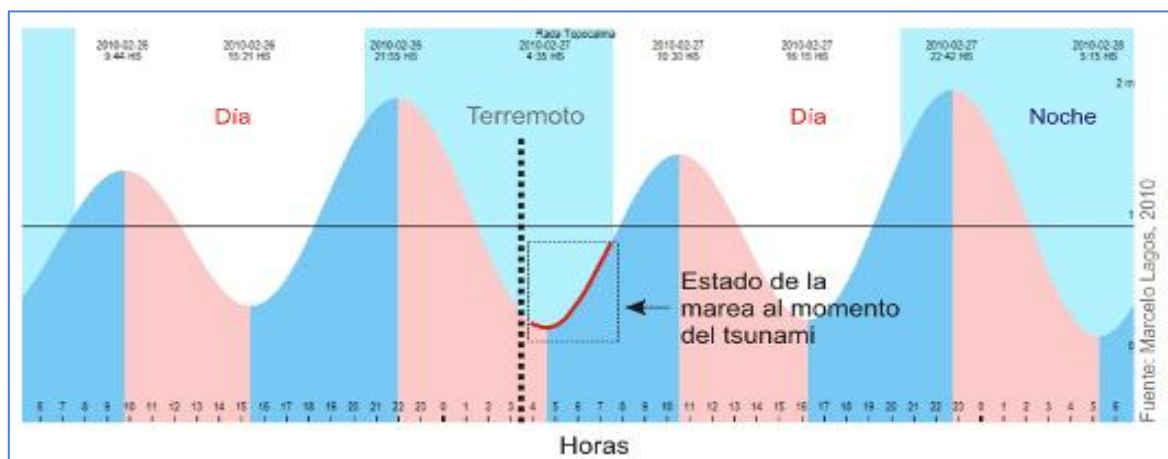


Figura 53. Estado de la marea al momento del arribo del tsunami de 2010 en la Bahía de Topocalma, comuna de Litueche, Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

Localidad	Localización		Rango de la marea en sicigias (m)
	Latitud °S	Longitud °W	
Bahía de Topocalma	34 08	72 01	1,8
Bahía de Pichilemu	34 23	71 59	1,52
Bahía de Llico	34 45	72 06	1,7
Puerto de Constitución	35 20	72 25	1,66
Bahía de Curanipe	35 51	72 38	1,2

Tabla 25. Rangos de la marea de sicigias en localidades costeras de las regiones de O'Higgins y Maule.

Una vez definida la cota de inundación máxima por tsunami para cada localidad, se espacializó el resultado en mapas mediante la proyección de la cota por su respectiva curva de nivel. Para ello, se utilizó topografía digital LIDAR (*Laser Imaging Detection and Ranging*) con resolución espacial inferior a un metro. Finalmente, mediante transectas perpendiculares a la línea de costa, se relacionan la altura máxima del tsunami con la topografía de detalle, estableciendo niveles de peligrosidad diferenciados a partir de la profundidad de inundación sobre el terreno (Figura 43.), utilizando como referencia Parámetro de daño propuestos por Shuto (1993) y Koshimura & Yanagisawa (2007).



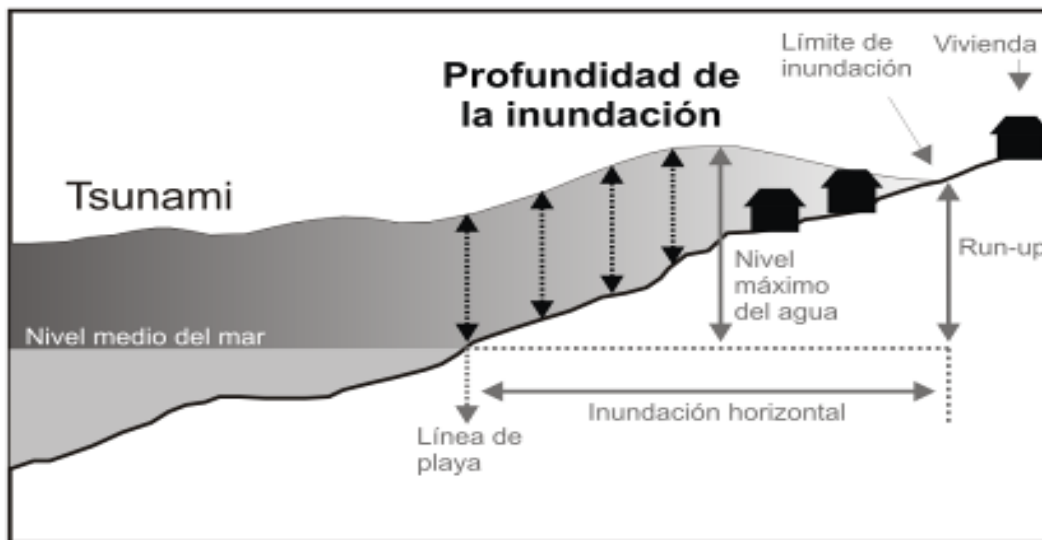


Figura 54. Profundidad de inundación por tsunami. Fuente: Lagos et al 2008.

La definición de áreas de inundación por tsunami basadas en el reciente evento del 27 de febrero de 2010, son una aproximación robusta para considerar el potencial comportamiento de futuros tsunamis en las costas de las regiones de O'Higgins y Maule. Considerando que este evento posee características excepcionales, en cuanto a la magnitud del terremoto generador, como también a las alturas de ola registradas en las costas, su uso como evento rector asigna objetividad a los potenciales escenarios de peligrosidad.

El uso de técnicas de simulación numérica es una primera estimación de la magnitud del tsunami en las costas. Se debe tener presente que la modelación considera generación, propagación y cálculo de altura de tsunami antes de arribar a la costa. El resultado es validado con los datos de alturas de ola medidos en terreno, en cada localidad. La modelación no incluye simulación de inundación, dado que esta última requiere batimetría de alta resolución.

La consideración del rango de la marea en sicigias y la ponderación por un factor de incertidumbre, permiten tener la certeza que se está considerando un tsunami de características excepcionales. La Figura 44. sintetiza la metodología utilizada para espacializar el peligro de tsunami.

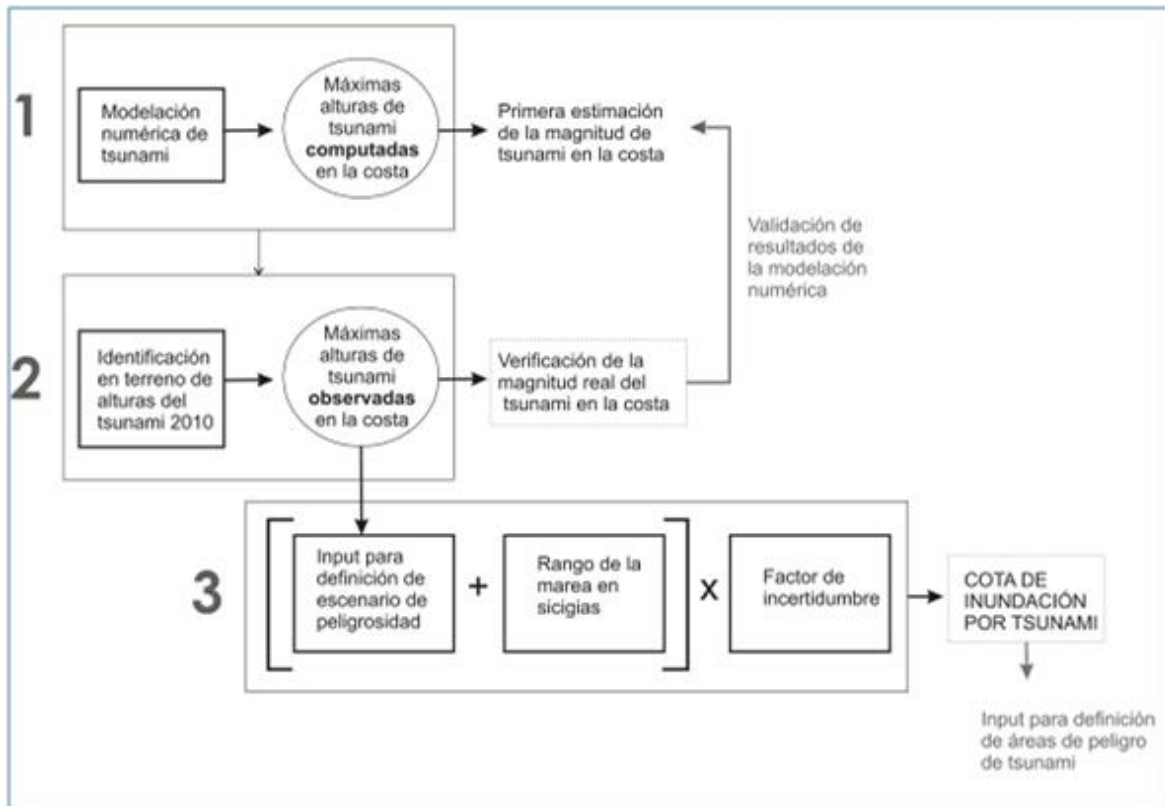
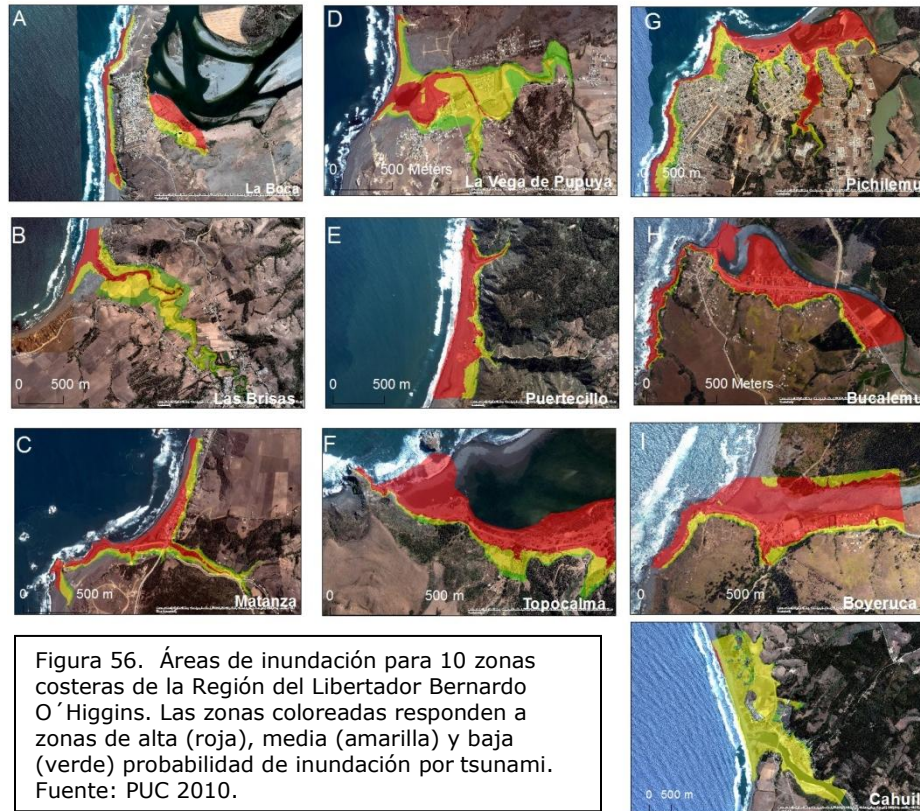


Figura 55. Modelo utilizado para espacializar la amenaza de tsunami. Fuente: PUC 2010.

### 9.3 Resultados.

#### 9.3.1 Riesgo de tsunami en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

La modelación de las áreas susceptibles de ser inundadas ante eventuales tsunamis están condicionadas claramente por las condiciones topográficas locales en el alcance de estos fenómenos. En la Figura 45., se puede observar que en planicies costeras y especialmente en las zonas de estuarios, los tsunamis pueden ingresar varios cientos de metros al continente inundando las tierras más bajas, observando además, la gran variabilidad local en cuanto al riesgo de inundación.



Estas observaciones son corroboradas por las variaciones en la cota máxima de inundación y la distancia recorrida por el mar tierra dentro durante el tsunami de febrero de 2010. Por ejemplo, la cota máxima de inundación alcanzada por el tsunami de 2010 en Boyeruca fue de 6.7 m. mientras que dicha cota en Punta Lobos fue 10.5 m. (Fritz et al., 2011). El área inundada a lo largo de la costa también demostró importantes variaciones locales. La inundación del tsunami de 2010 afectó áreas ubicadas 270 y 128 m. tierra adentro en Pichilemu y Matanzas respectivamente (Fritz et al., 2011).

La experiencia del tsunami de 2010 también muestra la influencia de la rugosidad del relieve en el alcance y potenciales efectos del tsunami en la población. En este sentido

cabe destacar que campos de dunas jugaron un rol moderador del impacto del tsunami en localidades como Punta de Lobos (Fritz et al., 2011).

### **9.3.2 Identificación de Sistemas Estratégicos Ubicados en Áreas de Riesgo de Tsunami.**

En la Región del Libertador General Bernardo O´Higgins existen numerosas localidades costeras ubicadas en zonas altamente susceptibles a ser inundadas ante eventuales tsunamis. (Tabla 26.). Los daños que pueden causar futuros tsunamis en la zona pueden ser ejemplificados a grandes rasgos, analizando los efectos que tuvo en la región el tsunami de 2010. Marín et al., (2010) reporta los daños sufridos por pobladores de 8 pequeños asentamientos pesqueros de esta región. Estos daños incluyen la destrucción de viviendas temporales, la pérdida de instrumentos de pesca y buceo y la pérdida de cultivos marinos. Estos antecedentes muestran la amplitud de los efectos negativos que pueden tener los tsunamis en la región, afectando no sólo infraestructura, sino que también los modos de sustento económico local.

Tsunamis de mayor magnitud (con cotas de inundación más alta, con mayor profundidad y con mayor alcance) pueden tener efectos aún más adversos en la población e infraestructura de la Región de O´Higgins, al tener la capacidad de afectar zonas densamente pobladas y sistemas estratégicos como centros de salud, oficinas públicas, escuelas y componentes de la red de transporte. Cabe destacar, por ejemplo, que en Pichilemu, actores que cumplen roles importantes en la gestión de emergencias a nivel local, como la Capitanía de Puerto y la Gobernación Provincial de Cardenal Caro, se ubican en zonas de alto riesgo de inundación por tsunami. También se observa además que numerosas viviendas se ubican áreas de alto riesgo de inundación.



<b>Sistemas estratégicos ubicados en zonas de riesgo de inundación por tsunami en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.</b>				
<b>Asentamientos humanos.</b>	<b>Redes Vitales.</b>	<b>Instalaciones esenciales.</b>	<b>Redes de transporte.</b>	<b>Instalaciones con alto potencial de daños.</b>
Numerosas localidades incluyendo:  La Boca. Las Brisas. Matanza. Puertecillo. La Vega de Pupuya. Puertecillo. Topocalma. Pichilemu. Cahuil. Bucalemu. Boyeruca.	Componentes menores del sistema de agua potable y eléctrico local.	2 postas de salud (Bucalemu y Cahuil).  6 establecimientos educacionales.  Un retén de carabineros (Bucalemu).  4 oficinas públicas.  2 establecimientos municipales.  Un recinto de bomberos (Cahuil).	Numerosas calles y rutas incluyendo:  Cruce Ruta 5 (San Fernando-Pichilemu).  Cruce I-72 Bucalemu.	No existen instalaciones con alto potencial de generar daños (e.g. embalses, plantas nucleares).

Tabla 26. Sistemas estratégicos localizados en zonas de riesgo de inundación por tsunami.  
Fuente: CSW Consultores Ambientales.

#### 9.4 Zonas de Seguridad y Resguardo.

A raíz del terremoto y tsunami de febrero de 2010 y de los efectos que tuvo en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, la Oficina Regional de Emergencia, dependiente de la Oficina Nacional de Emergencia, ONEMI, inició una serie de acciones tendientes a capacitar a la ciudadanía y a preparar información que, junto con planificar la evacuación de la población, permita definir zonas de seguridad y resguardo.

Para este efecto, se elaboraron planos de las localidades del borde costero regional y que conforman el Plan de Evacuación de la Localidades Costeras. Parte de la información utilizada proviene del Estudio de riesgo de sismos y maremoto para comunas costeras de las Regiones de O'Higgins y del Maule, elaborado por la Pontificia Universidad católica de Chile, año 2010 y la metodología utilizada fue la siguiente:

- 1.- La base topográfica utilizada fueron los Planos Marítimos Costeros (PMC) a escala 1: 10.000. De ellos se extrajo la línea de costa y la curva de 30 m. además de caminos y algunas construcciones.
- 2.- Debido a que los PMC no tiene una amplia y completa cobertura de la porción continental adyacente al borde costero, se utilizó la cota 30 generada por el Instituto Geográfico Militar, complementado así los sectores no cubiertos por los planos marítimos costeros.
- 3.- A partir del trazado de la cota 30 extraída de los PMC y del IGM, se ha definido el Área a Evacuar del todo el litoral costero. Este trazado ha respetado la información recogida de estudios especialmente contratados para definir zonas de inundación o áreas de seguridad, como es el caso del mencionado estudio elaborado por la Universidad Católica. A saber, al norte y al sur de la ciudad de Pichilemu se aplicó la cota 30, sin embargo en la ciudad misma se mantuvo los límites arrojados por ese estudio.

Con la definición de estas Zonas de Seguridad y Resguardo, el mapa de riesgos de tsunami contiene información complementaria. Por una parte, se ha especializado la amenaza y por otra, se ha incorporado la información de estas Zonas de Resguardo que están relacionadas con la gestión enfocada a la seguridad de la ciudadanía y en la cartografía preparada para este capítulo es posible visualizar ambos elementos.



# plan regional de ordenamiento territorial COMPONENTE RIESGOS



Figura 57. Mapa Amenaza de Inundación por Tsunami y Sistemas Estratégicos. (La Boca- Navidad) Fuente: Gobierno Regional de O'Higgins, 2012



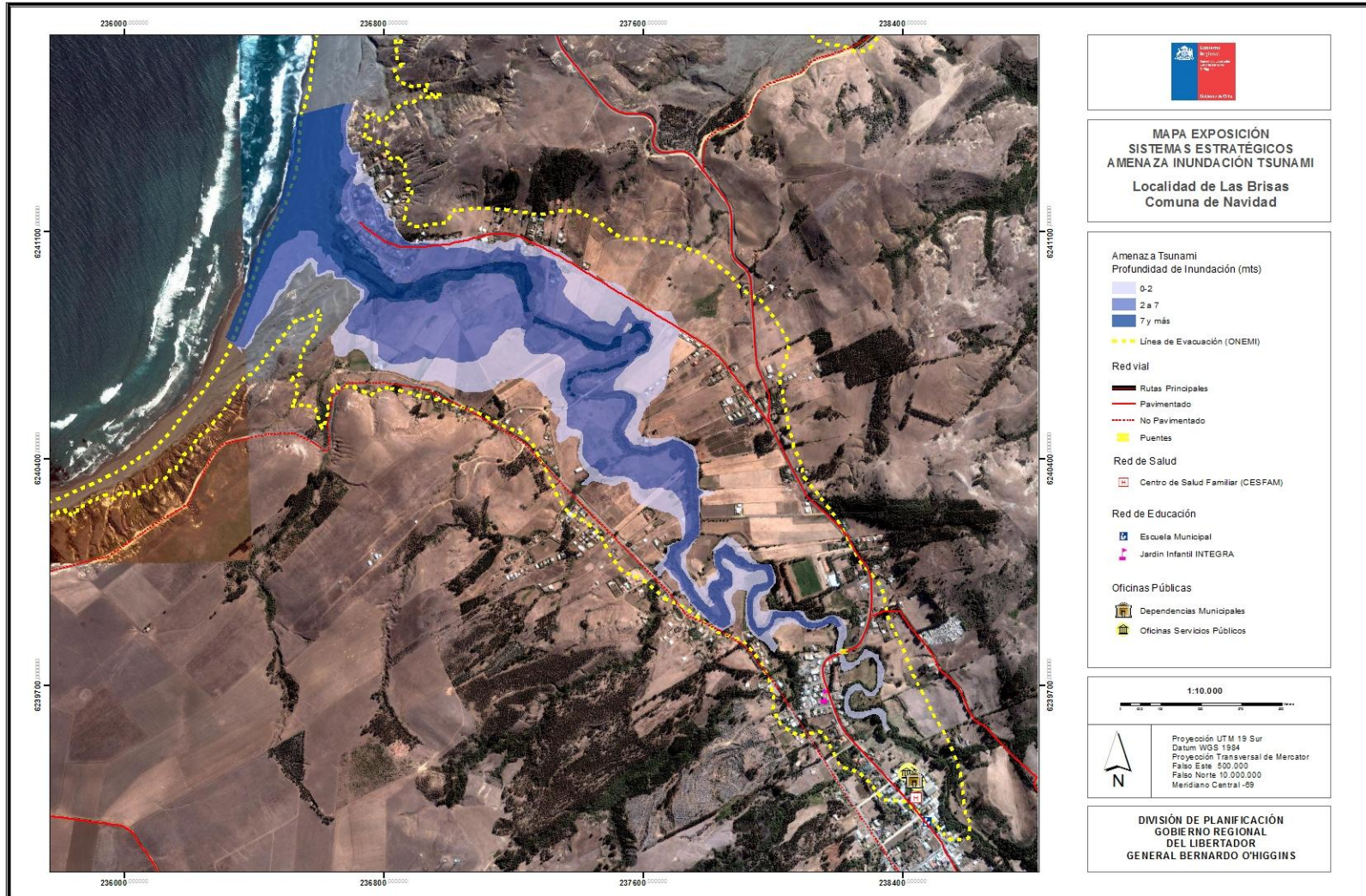


Figura 58. Mapa Amenaza de Inundación por Tsunami y Sistemas Estratégicos. (Las Brisas- Navidad) Fuente: Gobierno Regional de O´Higgins, 2012



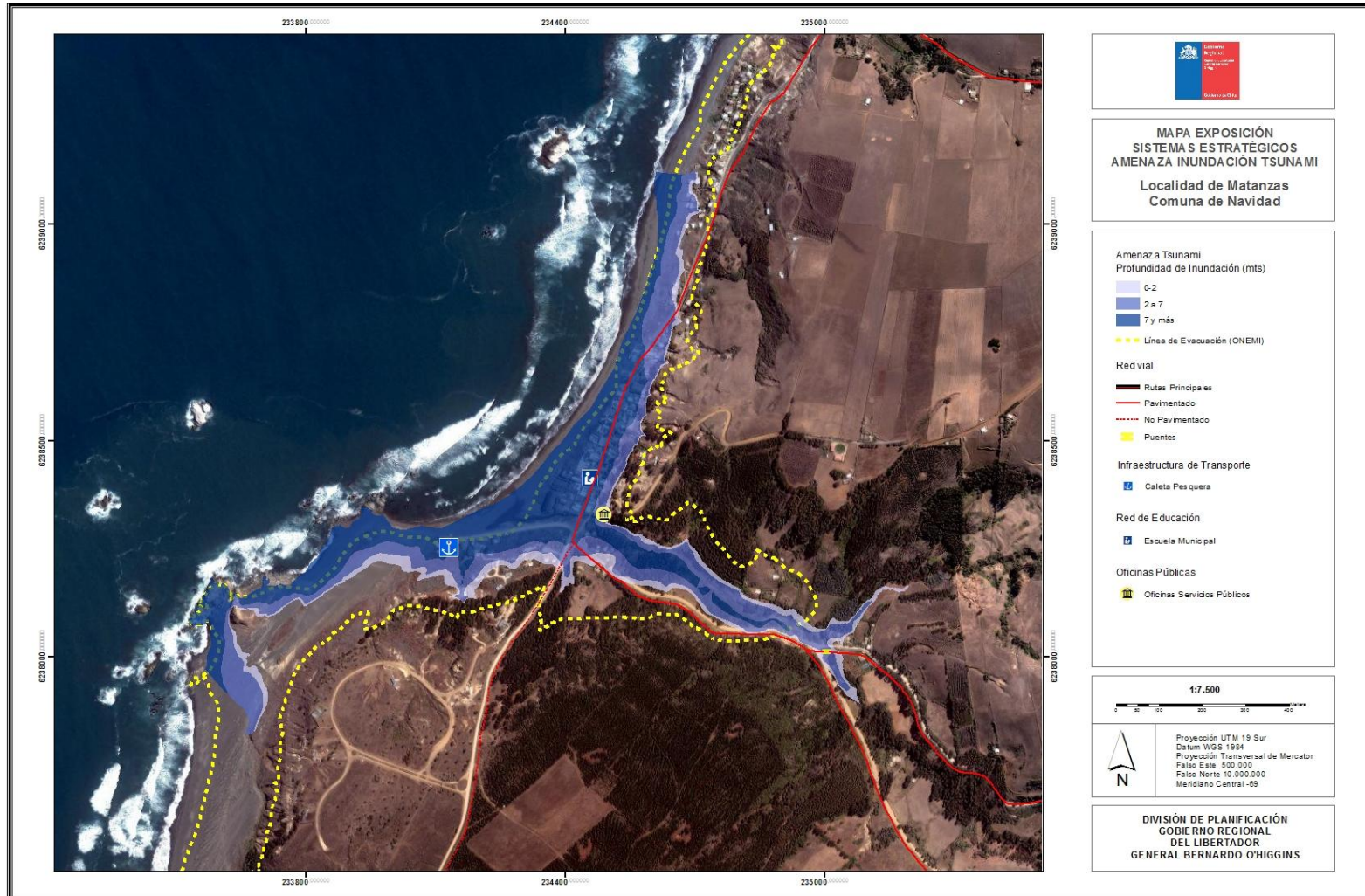


Figura 59. Mapa Amenaza de Inundación por Tsunami y Sistemas Estratégicos. (Matanzas- Navidad) Fuente: Gobierno Regional de O´Higgins, 2012



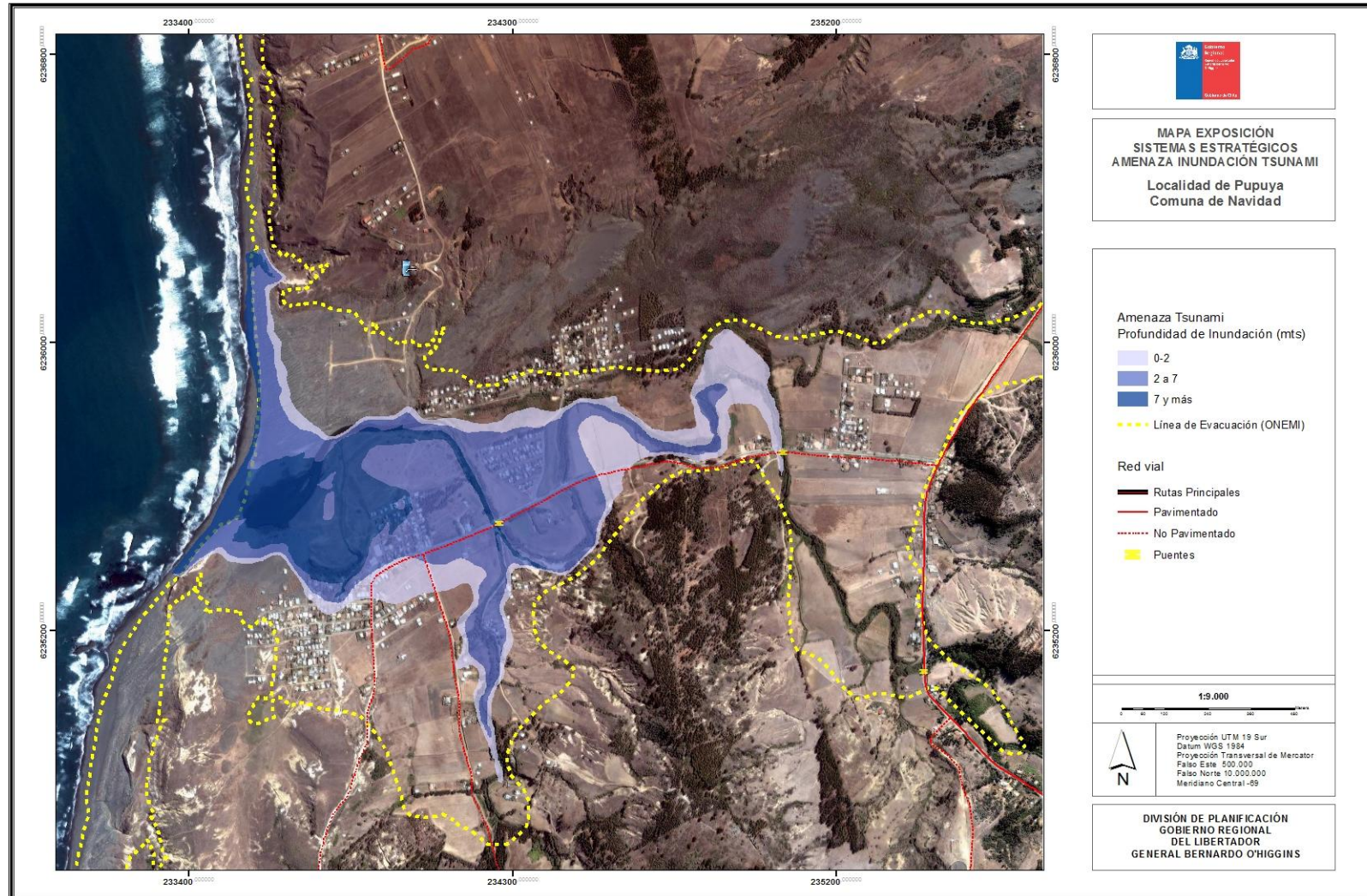


Figura 60. Mapa Amenaza de Inundación por Tsunami y Sistemas Estratégicos. (Pupuya- Navidad) Fuente: Gobierno Regional de O´Higgins, 2012



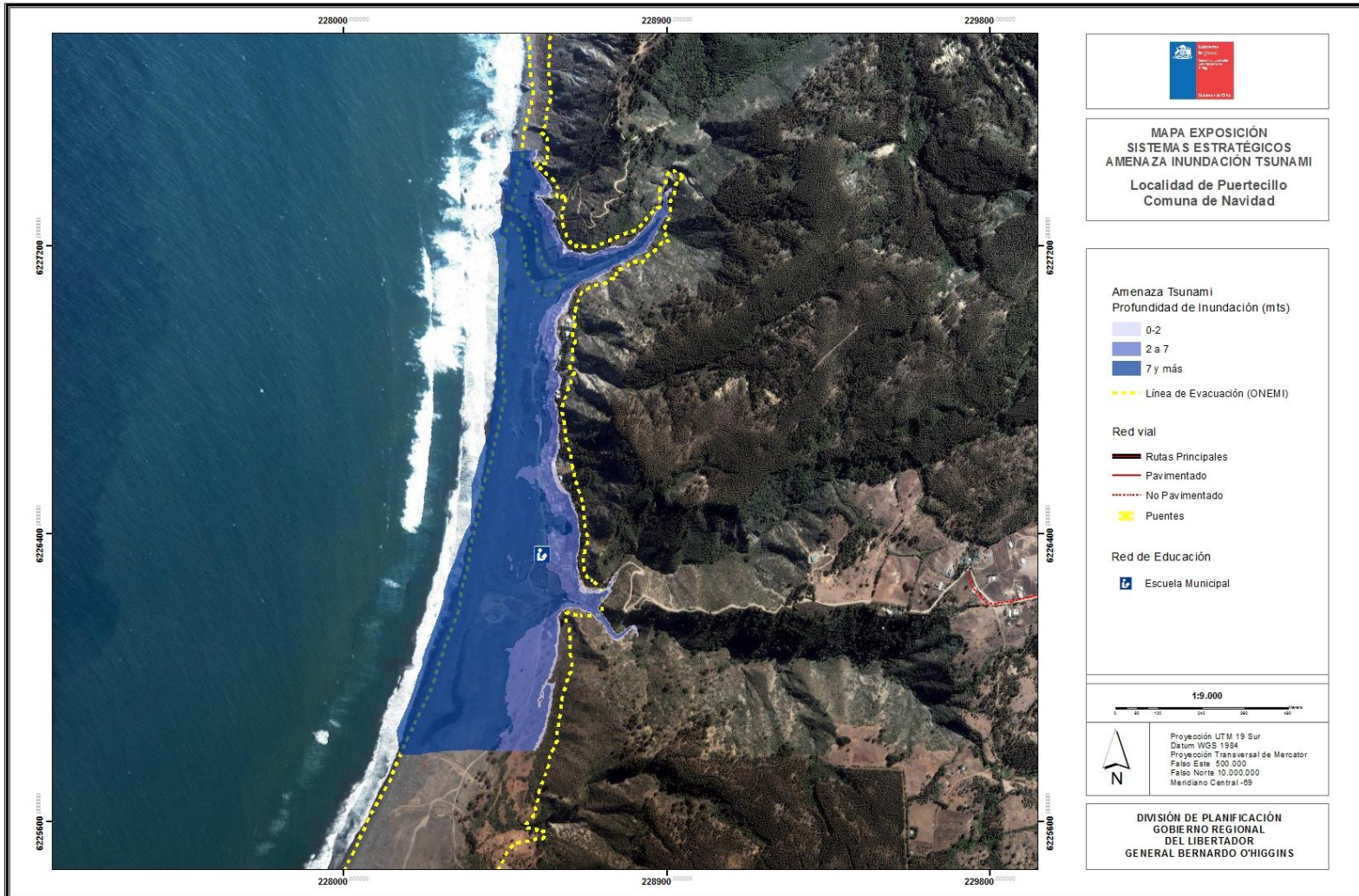


Figura 61. Mapa Amenaza de Inundación por Tsunami y Sistemas Estratégicos. (Puertecillo- Navidad) Fuente: Gobierno Regional de O´Higgins, 2012



**plan regional de ordenamiento territorial**  
**COMPONENTE RIESGOS**

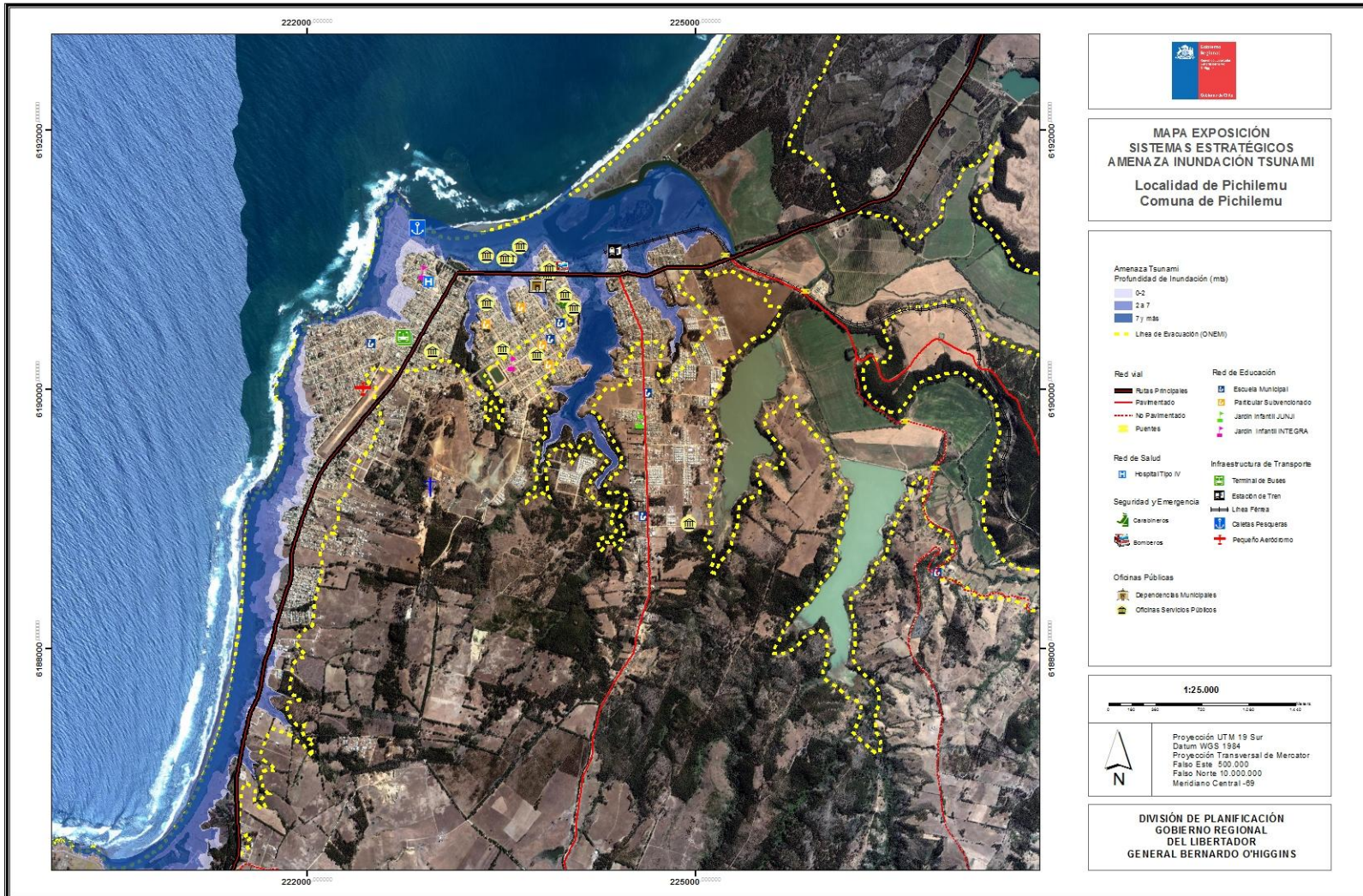


Figura 62. Mapa Amenaza de Inundación por Tsunami y Sistemas Estratégicos. (Pichilemu- Pichilemu) Fuente: Gobierno Regional de O´Higgins, 2012



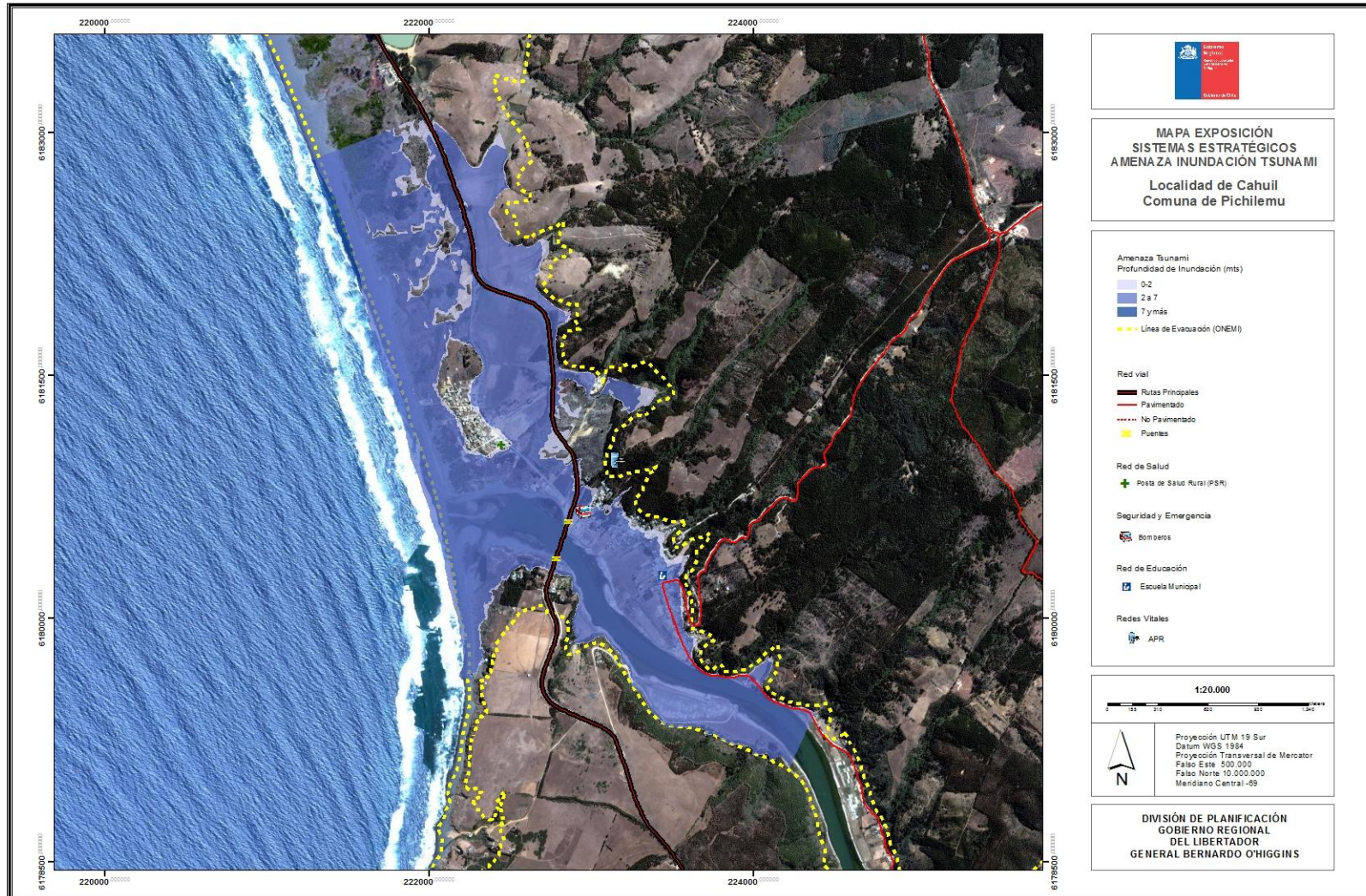


Figura 63. Mapa Amenaza de Inundación por Tsunami y Sistemas Estratégicos. (Cahuil- Pichilemu) Fuente: Gobierno Regional de O´Higgins, 2012



**plan regional de ordenamiento territorial**  
**COMPONENTE RIESGOS**



Figura 64. Mapa Amenaza de Inundación por Tsunami y Sistemas Estratégicos. (Bucalemu- Paredones) Fuente: Gobierno Regional de O´Higgins, 2012

## 9.5 Conclusiones y Recomendaciones.

Existen numerosas localidades emplazadas en zonas altamente susceptibles a ser afectadas por eventuales tsunamis en Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. Dicha susceptibilidad fue demostrada por los efectos regionales producidos por el tsunami de febrero de 2010 que afectó la región centro sur de Chile. Los tsunamis, a pesar de no tener una alta frecuencia, son amenazas permanentes en esta región debido a la activa sismicidad del borde costero. La zonificación del riesgo de inundación por tsunami es una herramienta esencial para el planeamiento territorial costero que sirve tanto para identificar sistemas estratégicos localizados en zonas de riesgo, como para regular el futuro uso del suelo.

La identificación de las áreas susceptibles de ser afectadas por tsunamis es una herramienta útil en el marco del ordenamiento territorial del borde costero. No obstante, para disminuir la pérdida de vidas humanas y económicas relacionadas con estos fenómenos es necesario complementar esta herramienta con otras medidas de carácter organizativo y/o estructural. Por ejemplo, es necesario educar a la población para que sepa cómo afrontar estos eventos, es necesario implementar sistemas de alerta temprana con efectivos medios de comunicación, funcionales en casos de emergencia, y por último es necesario construir o fortificar instalaciones esenciales con estructuras resistentes a este tipo de eventos catastróficos.

## 9.6 Bibliografía

- De Silva, D y Yamao M.2007. Effects of the tsunami on fisheries and coastal livelihood: a case study of tsunami-ravaged southern Sri Lanka. *Disasters*: 31(4):386–404.
- El Mercurio. 2010. Maremoto quitó la vida a124 personas en cuatro regiones, mayo 16, 2010;URL: <http://diario.elmercurio.com/2010/05/16/nacional/nacional/noticias/63E41BCD-D871-4757-AADA-55E12F9B5A8B.htmS>.
- Fritz, H.M., Petroff, C.M., Catalán, P.A., Cienfuegos, R., Winckler, P., Kalligeris, N., Weiss, R., Barrientos, S.E., Meneses, G., Valderas-Bermejo, C., Ebeling, C.,

Papadopoulos, A., Contreras, M., Almar, R., Domínguez, J.C., and Synolakis, C.E. 2011. Field survey of the 27 February 2010 Chile tsunami, *Pure Appl. Geophys.*, 168.

- Koshimura, S; Yanagisawa, H. 2007. Developing fragility functions for tsunami damage estimation using the numerical model and satellite imagery. 5th International Workshop on Remote Sensing Applications to Natural Hazards. Washington DC, p. 1-6.
- Lagos, M.2000. Tsunamis de origen cercano a las costas de Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*. N° 27, p. 93-102.
- Lagos, M.; Cisternas, M. y Mardones, M. Construcción de viviendas sociales en áreas de riesgo de tsunamis. *Revista de la Construcción*, 2008, Vol. 7, N° 2, p. 4-16.
- Marín, A., Gelcich, S., Araya, G., Olea, G., Espíndola, M., y Castilla, J.C. 2010. The 2010 tsunami in Chile: Devastation and survival of coastal small-scale fishing communities. *Marine Policy* 34(6):1381–1384.
- Pontificia Universidad Católica de Chile.2010. Estudio de riesgo de sismos y maremoto para comunas costeras de las Regiones de O'Higgins y del Maule. Santiago de Chile: Subsecretaria de Desarrollo Regional y Administrativo del Ministerio del Interior, Gobierno de Chile/Instituto de Estudios Urbanos y Territoriales y Observatorio de Ciudades UC, Facultad de Arquitectura, Diseño y Estudios Urbanos, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- SHOA. 2003. Tablas de marea de la costa de Chile. Publicación n° 3009. p.247.
- Shuto, N. 1993. Tsunami intensity and disasters. In *Tsunamis in the World*, S. Tinti, ed., Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, p. 197-216.

## 10. CONCLUSIONES FINALES Y MAPA SÍNTESIS

La Región del Libertador General Bernardo O'Higgins se ve expuesta a distintas amenazas, de menor a mayor magnitud, cobertura y recurrencia. Como ya se ha visto, en el presente estudio se analizaron las amenazas por : volcanes, sismos, inundaciones fluviales y por ruptura de embalses, incendios forestales y tsunamis.

- Los resultados expuestos permiten sostener que la región solo está mediamente expuesta a los peligros volcánicos. La zona de alto peligro volcánico definida en el estudio, alcanza sólo una superficie de 175 km<sup>2</sup> lo que corresponde a un 1,06 % de la superficie regional.

Las comunas potencialmente afectadas son Machalí y San Fernando, las restantes comunas presentan una nula exposición al impacto de erupciones.

La exposición de la población también es reducida, no existiendo registro de población en un radio de 10 km. en torno a volcanes activos.

Por último, no se reconoce infraestructura relevante en la zona de alto peligro.

- Por su ubicación, la región está constantemente expuesta a la amenaza sísmica. Los eventos de mayor magnitud se han concentrado en el área comprendida entre la línea de costa y aproximadamente 70 km. al este. En dicha zona existen numerosos asentamientos poblados y otros componentes de sistemas estratégicos que pueden verse afectados por movimientos sísmicos cercanos. Entre los centros poblados de mayor jerarquía se encuentra Pichilemu.

Debido a que la zona de alto riesgo sísmico abarca una superficie significativa del territorio regional, incluyendo localidades en el borde costero y ciudades y asentamientos rurales en el secano, los sistemas estratégicos susceptibles de ser afectados por sismos con epicentros cercanos son numerosos. Entre las localidades se cuentan por ejemplo, Pichidegua, Navidad, Lolol y La Estrella entre otros.



- En relación a la amenaza de inundación por ruptura de embalses, en general es posible concluir que los sistemas estratégicos mayormente afectados por la eventual falla de un embalse son tierras agrícolas en entidades rurales y redes de transporte. En casos particulares podrían verse dañadas también redes vitales, particularmente líneas de transmisión eléctrica.

Los factores de mayor riesgo de falla en cada embalse son diferentes. Existen 25 presas que son más susceptibles a fallar ante solicitudes sísmicas. Mientras que las presas de los 27 embalses restantes son más susceptibles a fallar por cambios abruptos en la escorrentía.

Los embalses de la región representan diferentes niveles de amenaza para la población que vive aguas abajo. En la zona de secano se ubican los embalses menos estables ante sismos o eventos meteorológicos. Los embalses que revierten mayor riesgo en general tienen baja capacidad de almacenamiento de agua.

Por ello es necesario, entre otras cosas, actualizar la información respecto a la estabilidad de los embalses. Conociendo las áreas susceptibles de ser inundadas con precisión permitiría desarrollar planes de contingencia ante la eventual falla de este tipo de infraestructura.

- En la región existe una superficie total de 655 km<sup>2</sup> de áreas altamente susceptibles de ser afectadas por incendios forestales. Estas superficies se ubican mayoritariamente en interfluvios y laderas de las Cordillera de la Costa.

Existen además otras áreas con alto riesgo de incendio forestal en zonas de baja altitud, así por ejemplo, podemos mencionar tanto en las zonas de *pie demot* de la Cordillera de Los Andes en donde es posible destacar extensas áreas de bosque nativo protegido al interior de la Reserva Nacional Río Cipreses. Por otra parte, en la zona costera destacan zonas de alto riesgo en como es el caso de Pataguilla y Navidad.

Existe un extenso corredor clasificado como de alto riesgo de incendio forestal al Norte de Chuchunco y Coltauco, entre otras localidades. Dicho corredor se

extiende de noreste a suroeste por aproximadamente 36 kilómetros y tiene un ancho de alrededor de 3 km.

Existen numerosas localidades rurales en los alrededores de áreas con alto riesgo de incendio forestal y otras localidades insertas dentro de dichas áreas. Entre estos centros poblados se cuentan Bucalemu, Topocalma, Pichidegua y el Manzano. Debido a esto existen algunas instalaciones esenciales y redes vitales que podrían verse afectadas por el fuego. Entre éstas se encuentran escuelas rurales y postas de salud.

- La mayor concentración de registros de inundaciones por eventos meteorológicos en la región ocurre en la cuenca media del río Tinguiririca. Precipitaciones intensas y/o prolongadas como el deshielo acelerado en primavera han producido inundaciones en la zona. No obstante, la información básica respecto a cada evento de inundación es incompleta, lo que limita los alcances de éste y posteriores estudios a escala regional.
- En la Región del Libertador General Bernardo O´Higgins existen numerosas localidades costeras ubicadas en zonas altamente susceptibles a ser inundadas ante eventuales tsunamis.

Los tsunamis a pesar de no tener una alta frecuencia, son amenazas permanentes en esta región debido a la activa sismicidad del borde costero. Cabe destacar, por ejemplo, que en Pichilemu actores que cumplen roles importantes en la gestión de emergencias a nivel local, como la Capitanía de Puerto y la Gobernación Provincial de Cardenal Caro, se ubican en zonas de alto riesgo de inundación por tsunami.

No obstante, para disminuir la pérdida de vidas humanas y económicas relacionadas con estos fenómenos es necesario utilizar esta información como base en el ordenamiento del territorio, complementando con otras medidas de carácter organizativo y/o estructural.

En esta línea, la ONEMI Regional ha definido las zonas de resguardo o seguridad en las localidades costeras de la región, utilizando la información

levantada a raíz del último evento ocurrido en febrero de 2010, llegando a establecer la cota 30 como un límite de seguridad, a partir del cual se evacuará la población ubicada bajo dicha cota.

A continuación se presenta el mapa síntesis de las amenazas incluidos en el Plan Regional de Ordenamiento Territorial y los mapas con la superposición de sistemas estratégicos para cada una de las amenazas estudiadas:



**plan regional de ordenamiento territorial**  
**COMPONENTE RIESGOS**

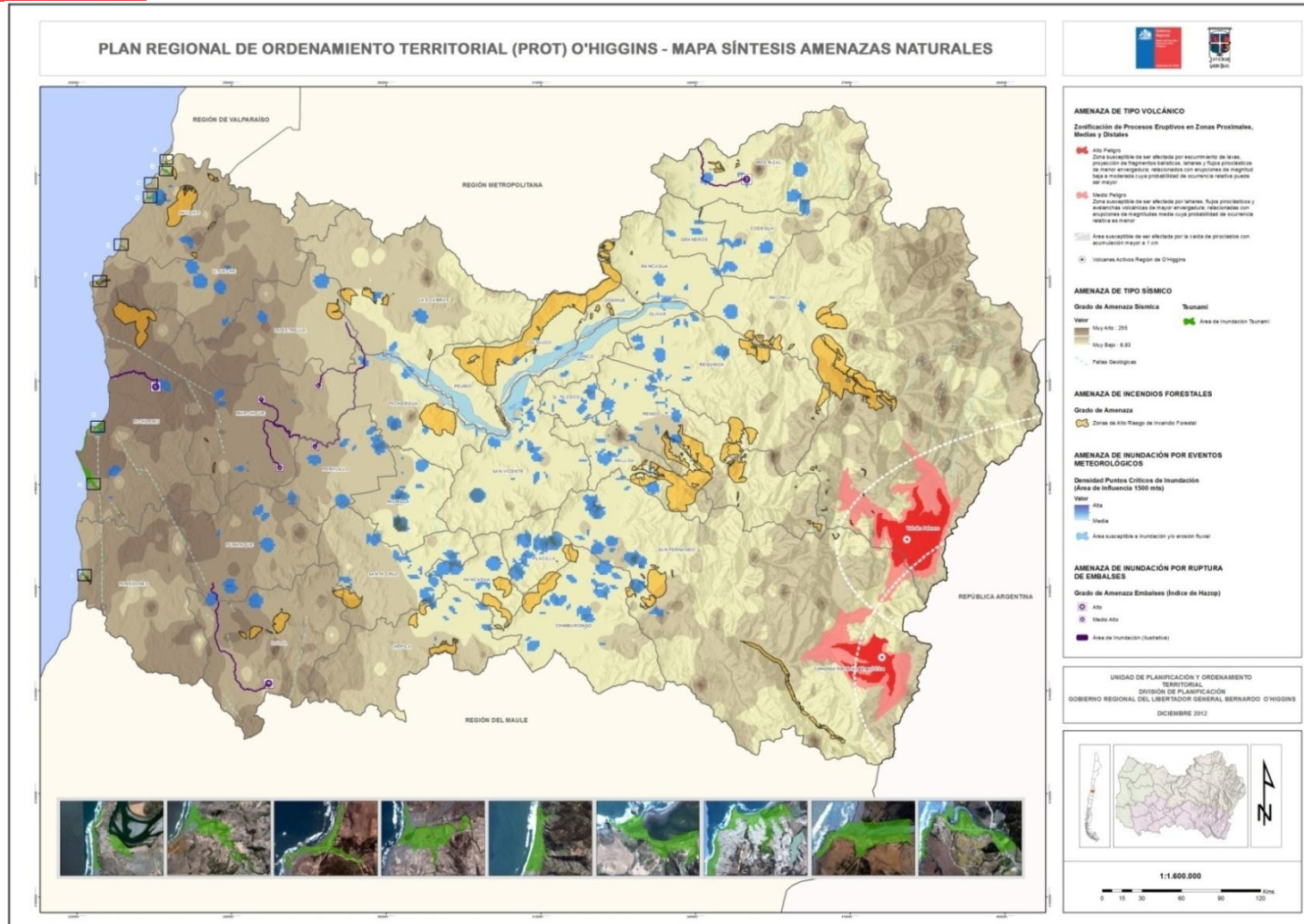


Figura 65. Mapa Síntesis Amenazas Naturales y Antrópicas , PROT, Región de O´Higgins. Fuente: Gobierno Regional de O´Higgins, 2012