ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL

PARQUE EÓLICO VIENTO PACÍFICO VERDE

ANEXO 3.4: GEOLOGÍA, GEOMORFOLOGÍA Y RIESGOS DE REMOCIÓN EN MASA

Región del Maule

2026

TABLA DE CONTENIDO

1 Introducción 1
2 Objetivos 1
2.1 Objetivo General 1
2.2 Objetivos específicos 1
3 Área de Estudio y área de influencia 1
3.1 Justificación del área de influencia 2
4 Metodología 3
4.1 Geología y geomorfología 3
4.2 Riesgo de remoción en masa 3
4.2.1 Trabajo de gabinete: levantamiento bibliográfico 4
4.2.2 Prospección de terreno 4
4.2.3 Trabajo de gabinete: Riesgo de remoción en masa 4
5 Resultados 15
5.1 Geología y geomorfología 15
5.1.1 Geología 15
5.1.2 Geomorfología 19
5.2 Riesgo de remoción en masa 23
5.2.1 Trabajo de gabinete: levantamiento bibliográfico 23
5.2.2 Resultados prospección de terreno 39
5.2.3 Trabajo de gabinete: Riesgo de remoción en masa 39
6 Conclusiones 44
7 Bibliografía 45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4-1. Factores condicionantes remoción en masa e incidencia en remociones en masa 5
Tabla 4-2. Ponderación de factores condicionantes para deslizamiento de suelo 9
Tabla 4-3. Ponderación de factores condicionantes para deslizamiento en roca 11
Tabla 4-4. Ponderación de factores condicionantes para caídas de roca 12

Tabla 4-5. Ponderación de factores condicionantes para flujos de detritos 13
Tabla 5-1. Clasificación de remociones en masa (Varnes, 1978) 23
Tabla 5-2. Escala de velocidad de remoción en masa (Cruden y Varnes, 1996)..... 24
Tabla 5-3. Tipos de Sismos..... 32
Tabla 5-4. Sismos con magnitud mayor localizados por el CSN en 2024. 35
Tabla 5-5. Precipitación máxima en 24 horas, estación La Estrella 38
Tabla 5-6. Precipitaciones máximas para 24 horas y diferentes periodos de retornos 38
Tabla 5-7. Factores condicionantes para deslizamiento de suelo 40
Tabla 5-8. Factores condicionantes para flujo de detritos 42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3-1. Área de influencia caracterización Uso del Territorio 2
Figura 4-1. Fases del trabajo de gabinete 3
Figura 4-2. Fases del trabajo de gabinete 4
Figura 4-3. Algunos tipos de remociones en masa..... 8
Figura 5-1. Unidades geológicas Carta Geológica Nacional en el área de estudio (escala 1:1.000.000) 16
Figura 5-2. Carta geológica Pichibelco-Cauquenes en el área de estudio (escala 1:100.000)..... 19
Figura 5-3. Pendientes en el área de emplazamiento del proyecto..... 20
Figura 5-4. Exposición de laderas en el área de influencia 21
Figura 5-5. Geomorfología local en el área de influencia. 22
Figura 5-6. Catastro Nacional de Remociones en Masa. 25
Figura 5-7. Geología nacional en el área de influencia (escala 1:1.000.000) 26
Figura 5-8. Geomorfología local en el área de influencia. 27
Figura 5-9. Red hidrográfica identificada 28
Figura 5-10. Carta de Ocupación de Tierras..... 29
Figura 5-11. Ejemplo de un registro de Tsunami. 30
Figura 5-12. Marco tectónico de Chile. 31
Figura 5-13. Zona de subducción y tipos de sismos que ocurren en ella..... 32
Figura 5-14. Cantidad de sismos percibidos y no percibidos por mes, año 2024 34

Figura 5-15. Sismicidad período 2014 - 2024 34

Figura 5-16. Magnitud y fecha de ocurrencia de sismos más cercanos al Proyecto durante 2024 . 36

Figura 5-17. Zona afectada por el terremoto y posterior tsunami de febrero de 2010 37

Figura 5-18. Susceptibilidad de riesgo de deslizamiento en suelo (IS_{DS}) 41

Figura 5-19. Susceptibilidad de riesgo de flujo de detritos (IS_F) 43

ÍNDICE DE APÉNDICES

Apéndice 3.4.1. Áreas de estudio y de influencia georreferenciada

1 INTRODUCCIÓN

En el presente acápite se desarrolla la caracterización de los componentes geología, geomorfología y riesgo geológico en el área de emplazamiento del Proyecto “Parque Eólico Viento Pacifico Verde”, conforme a lo establecido por la Ley 20.417 y el Artículo N°18 literal e.1) del Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (D.S. N°40/2012 del Ministerio del Medio Ambiente).

Para caracterizar estos componentes en el área en que se establecerá el Proyecto y su área circundante, se desarrollará una sección para describir la geología en el área del proyecto, de acuerdo con las publicaciones del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), otra para la geomorfología local, y una tercera sección que compila estos componentes y otros necesarios para el análisis de riesgo de remoción en masa en el área del proyecto.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo del presente acápite corresponde a identificar y describir las características de los componentes geología y geomorfología, en el área de Influencia determinada y su relación con el área de emplazamiento del Proyecto, con el fin de entregar información que permita evaluar posteriormente los riesgos asociados en el área.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar y caracterizar las unidades geológicas en el área de influencia.
- Identificar y caracterizar las unidades geomorfológicas en el área de influencia.
- Identificar y analizar los factores que pueden dar lugar a la probabilidad de ocurrencia de remoción en masa, generando afectación en el área del proyecto.

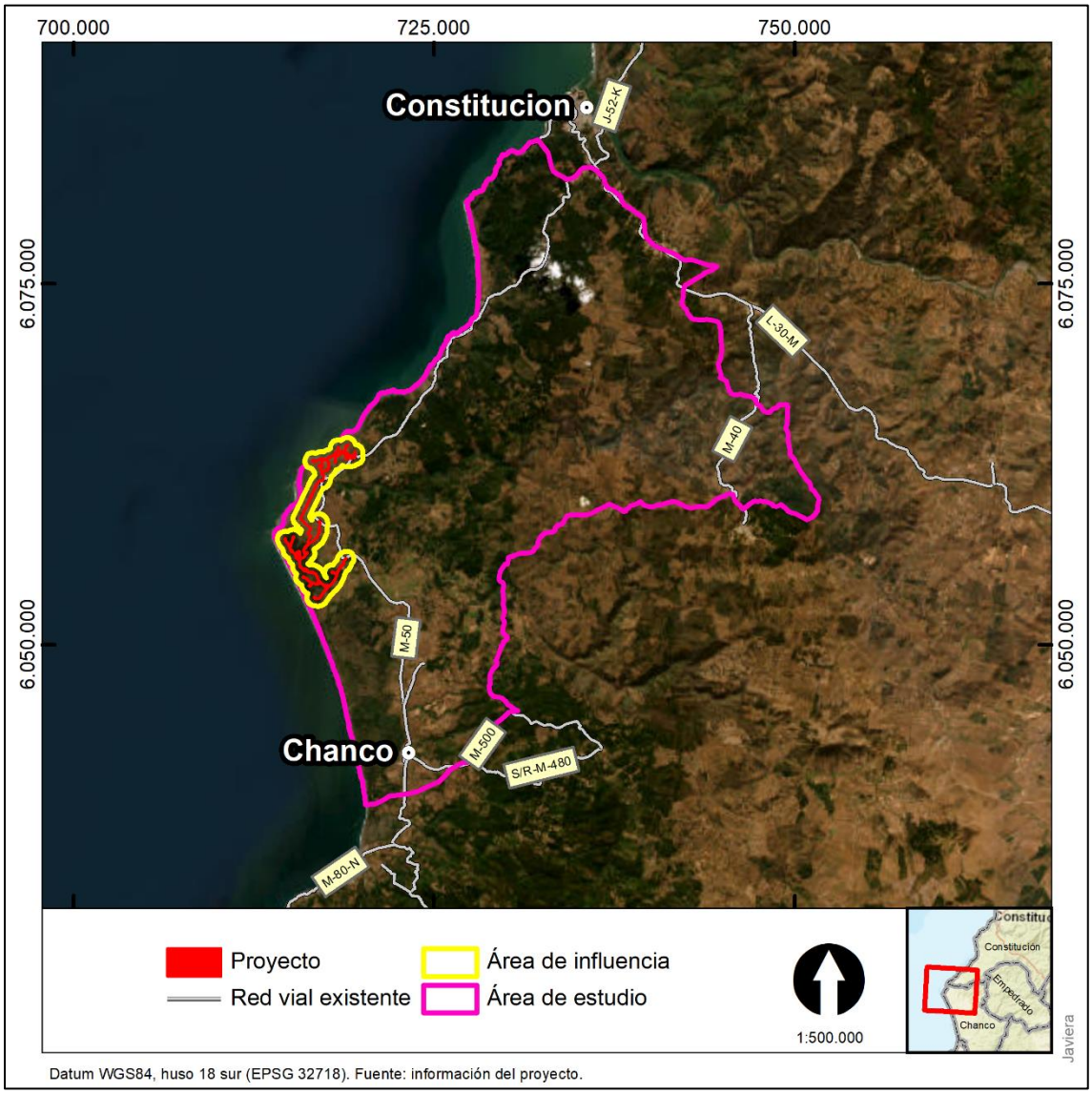
3 ÁREA DE ESTUDIO Y ÁREA DE INFLUENCIA

Se considera como área de estudio una superficie de 73.228,90 ha, correspondiente a las sub-subcuencas hidrográficas sobre las que se emplaza el proyecto: Costeras entre Quebrada Honda y Rio Reloca, Rio Reloca Entre Arriba Estero Empedrado y Desembocadura y Costeras entre Rio Reloca y Rio Curanilahue.

Con respecto al área de influencia, los componentes de geología y geomorfología corresponden a atributos del medio ambiente a caracterizar, por lo que el área de influencia aplicará únicamente al riesgo de remoción en masa, considerando un buffer de 500 m en torno a las obras temporales y permanentes del proyecto, excluyendo la superficie marítima, abarcando 2.594,16 ha.

A continuación, la Figura 3-1, muestra la cartografía del área de influencia para este componente.

Figura 3-1. Área de influencia caracterización geología, geomorfología y riesgo de remoción en masa



Fuente: Foco Ambiental, 2025

3.1 JUSTIFICACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA

El área de influencia de la componente se ha definido con un radio estándar de 500 m en torno a las obras temporales y permanentes del proyecto, con objeto de contener diferentes factores condicionantes, y de este modo, analizar la susceptibilidad de riesgo de remoción en masa fuera del área intervenida del proyecto, pero que pudiese afectarle por extensión.

4 METODOLOGÍA

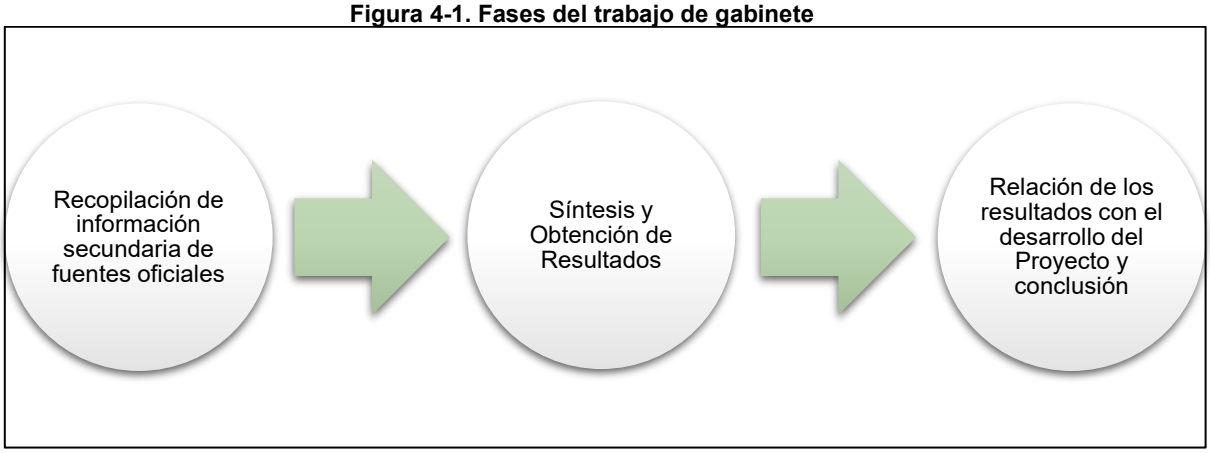
La caracterización geológica y geomorfológica se realizó simultáneamente desde gabinete. Para ello se utilizó como base el Mapa Geológico del SERNAGEOMIN a escala 1:100.000 que contiene en él toda el área de Influencia del Proyecto, además de información de fuentes secundarias, consistentes principalmente en mapas disponibles en la web, cartas topográficas, y publicaciones científicas del área y estudios anteriores.

Posteriormente, se han considerado estos componentes y otros de la presente DIA, tales como vegetación, suelo e hidrología, para analizar el riesgo de remoción en masa, con uso del modelo digital de terreno (DMT) y el software ArcGIS 10.8.

4.1 GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

El trabajo de gabinete para los componentes geología y geomorfología consta de tres fases consecutivas, sintetizadas a continuación:

Figura 4-1. Fases del trabajo de gabinete



Fuente: Foco Ambiental, 2025.

A continuación, se señalan las principales fuentes bibliográficas consultadas:

- Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN);
- Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN);
- Atlas de Riesgos Climáticos para Chile (ARClim). Explorador de Amenazas Climáticas.

4.2 RIESGO DE REMOCIÓN EN MASA

El análisis de riesgo de remoción en masa consta de un trabajo preliminar de gabinete, en el que se reúnen los antecedentes de eventos de remoción en masa en la zona, así como de los factores condicionantes y gatillantes de este tipo de fenómenos. Esto es complementado con las visitas a terreno por parte de distintos componentes ambientales, especialmente flora y vegetación, suelos e

hidrología, entre otros, y esta información se conjuga en gabinete con geoprocesos del software ArcGIS 10.8 para obtener un análisis del riesgo de remoción en masa, fundamentado en el método planteado por Muñoz (2013), ajustado por Ceballos (2016).

A continuación, se presenta en detalle la descripción de los pasos metodológicos.

4.2.1 Trabajo de gabinete: levantamiento bibliográfico

El trabajo de gabinete consta de tres fases consecutivas, las cuales se sintetizan a continuación:

Figura 4-2. Fases del trabajo de gabinete



Fuente: Foco Ambiental, 2025.

4.2.2 Prospección de terreno

Se realizan campañas de terreno en la cual se recorrió toda el área del proyecto con la finalidad de evidenciar fenómenos de remoción, poniendo especial énfasis en cambios de coloración o evidencias de flujos anteriores. Esto tiene por objetivo, en el caso de realizar hallazgos, delimitar áreas en las cuales se deba realizar un análisis específico de las particularidades que dan origen al desplazamiento.

4.2.3 Trabajo de gabinete: Riesgo de remoción en masa

La metodología para la Probabilidad de ocurrencia del riesgo se basó en la evaluación de susceptibilidad a las remociones en masa, de acuerdo con lo establecido en el método planteado por Muñoz (2013), ajustado por Ceballos (2016), como se presenta a continuación:

$$IS = \left(\sum_{i=1}^{m} f_i\right) \cdot f_n$$

Donde:

- IS: índice de susceptibilidad al deslizamiento.
- f_i: factor de susceptibilidad.
- f_n: factor asociado a la compatibilidad del material de la unidad con el mecanismo analizado.

Cabe señalar que un valor IS igual o superior a 50 indica susceptibilidad. Las unidades geomorfológicas con dicha valoración deben ser evaluadas con respecto a la probabilidad de falla, su alcance, y finalmente, evaluar el peligro geológico asociado.

4.2.3.1 Factores condicionantes

Son aquellos factores que inciden en la generación de una situación potencialmente peligrosa o inestable, como se presenta en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1. Factores condicionantes remoción en masa e incidencia en remociones en masa

Factores condicionantes	Tipo de remoción en masa				
	Caídas	Deslizamientos	Toppling	Flujos	Extensiones laterales
Geología y geotecnia	X	X	X	X	X
Geomorfología	X	X	X	X	X
Hidrología e hidrogeología	X	X	X	X	X
Vegetación y clima		X		X	X
Actividad antrópica	X	X	X	X	

Fuente: Muñoz (2013).

a) Geología

Referente al tipo de depósito y material, densidad, plasticidad, humedad y permeabilidad, así como a la litología, estructura, alteración y meteorización, se obtiene identificando cada tipo litológico presente en el área de estudio de acuerdo con la Carta Geológica de Chile a escala 1:1.000.000 del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN, 2000).

Los rasgos geomorfológicos que condicionan eventos de remoción en masa son principalmente la topografía, pendientes de las laderas, cambios fuertes de pendientes de las laderas y la extensión y altura de las laderas. Estas características inciden en la velocidad, energía y volumen de las remociones que puedan originarse. Así también, cualquier modificación de ellos puede transformar una ladera estable en inestable y generar remociones (Popescu, 2002). Por otro lado, influyen la forma y superficie de las hoyas hidrográficas, orientación de laderas y su consecuente exposición al sol.

b) Geomorfología

Considera la topografía y pendientes, cambios fuertes de pendientes, extensión y altura de ladera, mediante un Modelo Digital de Elevación (MDE). Con el MDE construido se logró obtener la pendiente de la zona de estudio, factores asociados a la erodabilidad, y por tanto, con el potencial de remoción en masa de un terreno en particular (Araya y Börgel, 1972).

c) Hidrología e hidrogeología

Red de drenaje, posiciones y variaciones del nivel freático, caudales, coeficientes de escorrentía y de infiltración. El agua juega un papel negativo en la resistencia de los materiales, ya que genera presiones intersticiales que reducen la resistencia, aumentan los esfuerzos de corte por el incremento de peso del terreno y generan fuerzas desestabilizadoras en grietas y discontinuidades, a la vez que reduce la resistencia al corte de discontinuidades al lavar los rellenos de estas (González de Vallejo *et al*. en Muñoz, 2013).

d) Vegetación

La vegetación puede contribuir en disminuir el efecto erosivo sobre las laderas, puesto que las raíces absorben agua y pueden reducir el grado de saturación del suelo, y estabilizan laderas actuando como anclajes de reforzamiento.

e) Clima

Contempla elementos del clima como el viento, temperaturas, radiación solar y precipitaciones inciden en fenómenos erosivos. Las situaciones más críticas se vinculan a la frecuencia y severidad de fenómenos extremos (sequías e inundaciones).

f) Actividad antrópica

La modificación del terreno afecta los estados tenso-deformacionales del terreno y sus propiedades geotécnicas, generando inestabilidades, principalmente hundimientos, caídas, deslizamientos y flujos. Entre las modificaciones más relevantes se cuentan los cambios de geometría y pendiente, condiciones hidrogeológicas y las fuerzas estáticas externas, siendo las más desfavorables son aquellas que se realizan a pie de las laderas, por soportar esta zona las mayores tensiones

4.2.3.2 Factores gatillantes

Son aquellos factores que pueden iniciar una actividad de remoción en masa.

a) Precipitaciones

Las precipitaciones se evalúan en función de los datos históricos sobre precipitaciones en las estaciones meteorológicas más cercanas al Proyecto, de acuerdo con lo presentado en las líneas de base referidas a hidrología e hidrogeología.

b) Sismicidad

Para el caso la sismicidad, se considera la zonificación sísmica en el territorio nacional de acuerdo con la NCh433, así como los antecedentes de eventos históricos.

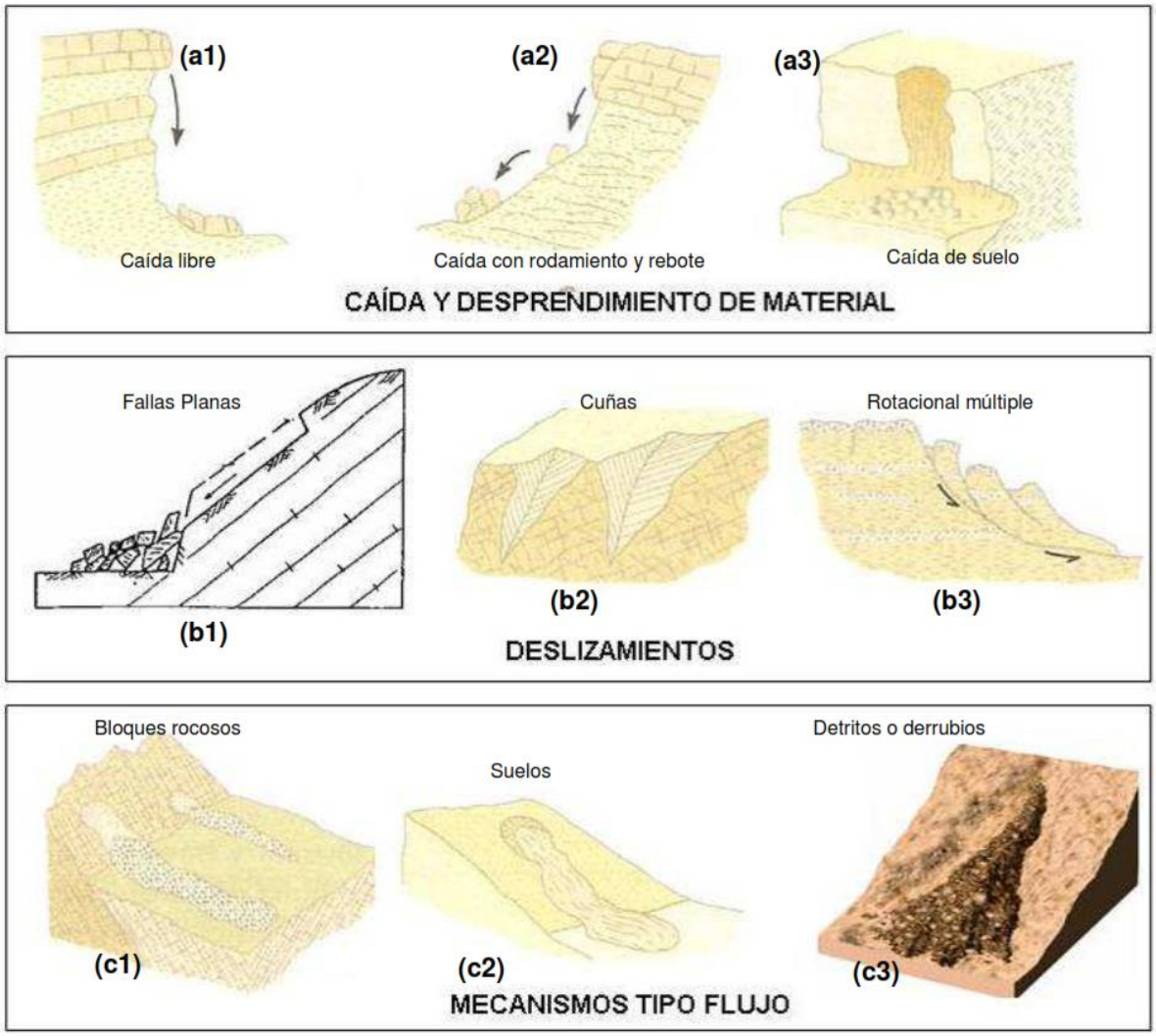
4.2.3.3 Evaluación de la susceptibilidad de remociones en masa

La susceptibilidad de remociones en masa es analizada en base a los factores condicionantes y gatillantes del área del proyecto, cuya ponderación varía según el tipo de actividad evaluada. Para esto se consideran cuatro tipos de remociones en masa:

- **Deslizamiento de suelo**: Los deslizamientos de suelo son movimientos de suelo y sedimentos ladera abajo que ocurren a través de una o más superficies de cizalle predefinidas, ya sean discontinuidades del macizo rocoso o a partir de las condiciones de resistencia de los suelos que definirán su fallamiento, como por ejemplo mediante el criterio de falla de Mohr-Coulomb (Lara, 2007).
- **Deslizamiento en Roca**: Los deslizamientos de roca son movimientos de roca ladera abajo que ocurren a través de una o más superficies de cizalle predefinidas, ya sean discontinuidades del macizo rocoso o a partir de las condiciones de resistencia de los suelos que definirán su fallamiento, como por ejemplo mediante el criterio de falla de Mohr-Coulomb (Lara, 2007).
- **Caída de Roca**: Las caídas o desprendimientos de bloques de roca o masas de roca son eventos muy rápidos (González de Vallejo et al., 2002) en los cuales el material movilizado se separa del macizo rocoso que lo contiene, viéndose favorecidos por la existencia de planos de debilidad y por laderas con geometrías irregulares. El material desprendido podrá alcanzar el pie del talud mediante caída libre (ver tipos a1 y a3, Figura 4-3), ruedo y rebote (tipo a2, Figura 4-3) o una combinación de ellas.
- **Flujo de detritos**: Otro tipo de mecanismo frecuente son los flujos (tipo c, Figura 4-3), y que corresponden a movimientos continuos en el espacio, donde las superficies de ruptura no son preservadas y las masas desplazadas son fuertemente deformadas internamente, comportándose de manera similar a un líquido viscoso de material saturado en agua (Varnes, 1978). Existen distintas clasificaciones para los flujos, basadas por un lado en el tipo de material movilizado (barro, detritos o fragmentos rocosos) y en la proporción de líquido y sólido que presenten. Su ocurrencia dependerá de la disponibilidad de material

(generalmente disgregado) que pueda ser arrastrado ladera abajo por la acción de agua, lo que hace que se mecánicamente como un fluido no newtoniano.

Figura 4-3. Algunos tipos de remociones en masa



Fuente: Muñoz (2013).

a) Evaluación de la susceptibilidad a deslizamiento en suelo (IS_{DS})

La evaluación de la susceptibilidad a deslizamiento en suelo (IS_{DS}) se realiza en base a 10 factores, tanto condicionantes como gatillantes, de acuerdo con los valores presentados en la Tabla 4-2 y la siguiente ecuación:

$$IS_{DS} = \left(\sum_{i=1}^{9} f_i\right) \cdot f_{10}$$

Tabla 4-2. Ponderación de factores condicionantes para deslizamiento de suelo

Factor		Especificaciones	Rangos	
1	Pendientes de laderas	Promedio de ladera	0º - 15º	0
			15º - 20º	9
			20º - 25º	15
			25º - 30º	21
			30º - 40º	26
			>40º	30
2	Exposición al sol	Laderas norte	Alta	5
		Laderas este – oeste	Parcial	3
		Laderas sur	Baja	1
3	Características geológicas – geotécnicas del material	Las condiciones muy favorables pueden ser, entre otros: baja densidad, baja resistencia, alta cantidad de material fino en su composición. La generación de material removible a partir de roca se ve favorecido por alta meteorización y alteración	Muy favorable	20
			Favorable	14
			Medianamente favorable	10
			Poco favorable	6
			Muy poco favorable	2
4	Condiciones de humedad y saturación	Se considera favorable una relación de profundidad de nivel freático y espesor de suelo $\frac{NF}{ES} \sim 0{,}5$	Muy favorable	10
			Favorable	7
			Poco favorable	3
			Muy poco favorable	2
5	Acumulación de nieve	Según estacionalidad	Siempre	5
			Estacional	2
			Esporádica	1
			Nula	0
6	Cobertura vegetal	Densidad en la ladera	Nula a baja	5
			Moderada	2
			Alta	0

Factor		Especificaciones	Rangos	
7	Desestabilización artificial de laderas	Por ejemplo: cortes artificiales en laderas, construcción de terraplenes, etc.	Importante	10
			Poco importante	5
			No observado	0
8	Deslizamientos declarados en la unidad geomorfológica	Información escrita y/u observación de escarpes y superficies de deslizamiento	Presente	10
			Sin antecedentes	3
			No observado	0
9	Deslizamientos declarados en la unidad geológica de suelo	Información escrita y/u observación de escarpes y superficies de deslizamiento	Presente	5
			Sin antecedentes	2
			No observado	0
10	Tipo de material	En este caso, el material roca no está en estudio, por lo tanto, pondera al resto de los factores	Suelo	1
			Roca (cobertura <1 m de suelo)	0

Fuente: Foco Ambiental, con base en Muñoz (2013) y Ceballos (2016)

b) Evaluación de la susceptibilidad a deslizamiento en roca (IS_{DR})

La evaluación de la susceptibilidad a deslizamiento en roca (IS_{DR}) se realiza en base a 6 factores, tanto condicionantes como gatillantes, de acuerdo con los valores presentados en la Tabla 4-3 y la siguiente ecuación:

$$IS_{DR} = \left(\sum_{i=1}^{5} f_i\right) \cdot f_6$$

Tabla 4-3. Ponderación de factores condicionantes para deslizamiento en roca

Factor		Especificaciones	Rangos	
1	Pendientes de laderas	Promedio de ladera	0º - 15º	0
			15º - 20º	11
			20º - 25º	15
			25º - 30º	20
			30º - 40º	25
			40º - 60º	30
			>60º	35
2	Características geológicas – geotécnicas del material	Las condiciones muy favorables pueden ser, entre otros: baja densidad, baja resistencia, alta cantidad de material fino en su composición. La generación de material removible a partir de roca se ve favorecido por alta meteorización y alteración	Muy favorable	35
			Favorable	28
			Medianamente favorable	18
			Poco favorable	11
			Muy poco favorable	4
3	Acumulación de nieve	Según estacionalidad	Siempre	5
			Estacional	2
			Esporádica	1
			Nula	0
4	Desestabilización artificial de laderas	Por ejemplo: cortes artificiales en laderas, construcción de terraplenes, etc.	Importante	10
			Poco importante	5
			No observado	0
5	Deslizamientos declarados en la ladera	Información escrita y/u observación de escarpes y superficies de deslizamiento	Presente	15
			Sin antecedentes	5
			No observado	0
6	Tipo de material	En este caso, el material roca no está en estudio, por lo tanto, pondera al resto de los factores	Suelo	0
			Roca (cobertura <1 m de suelo)	1

Fuente: Foco Ambiental, con base en Muñoz (2013) y Ceballos (2016)

c) Evaluación de la susceptibilidad a caídas de roca (IS_C)

La evaluación de la susceptibilidad a caías de rocas (IS_C) se realiza en base a 6 factores, tanto condicionantes como gatillantes, de acuerdo con los valores presentados en la Tabla 4-4 y la siguiente ecuación:

$$IS_C = \left(\sum_{i=1}^{5} f_i\right) \cdot f_6$$

Tabla 4-4. Ponderación de factores condicionantes para caídas de roca

Factor		Especificaciones	Rangos	
1	Pendientes de laderas	Promedio de ladera	0º - 15º	0
			15º - 20º	4
			20º - 25º	10
			25º - 30º	18
			30º - 40º	25
			40º - 60	32
			>60º	35
2	Características geológicas – geotécnicas del material	Las condiciones más favorables pueden ser, entre otros: baja densidad, baja resistencia, alta cantidad de material fino en su composición. La generación de material removible a partir de roca se ve favorecido por alta meteorización y alteración	Muy favorable	35
			Favorable	24
			Medianamente favorable	15
			Poco favorable	9
			Muy poco favorable	3
3	Acumulación de nieve	Según estacionalidad	Estacional	10
			Siempre	4
			Esporádica	2
			Nula	0
4	Desestabilización artificial de laderas	Por ejemplo: cortes artificiales en laderas, construcción de terraplenes, etc.	Importante	5
			Poco importante	3
			No observado	0
5	Deslizamientos declarados en la ladera	Información escrita y/u observación de escarpes y superficies de deslizamiento	Presente	15
			Sin antecedentes	5
			No observado	0
6	Tipo de material	En este caso, el material roca no está en estudio, por lo tanto, pondera al resto de los factores	Suelo	0
			Roca (cobertura <1 m de suelo)	1

Fuente: Foco Ambiental, con base en Muñoz (2013) y Ceballos (2016)

d) Evaluación de la susceptibilidad a flujos de detritos (IS_F)

La evaluación de la susceptibilidad a flujos de detritos (IS_F) se realiza en base a 11 factores, tanto condicionantes como gatillantes, de acuerdo con los valores presentados en la Tabla 4-5 y la siguiente ecuación:

$$IS_F = \left(\sum_{i=1}^{11} f_i\right) \cdot f_{12}$$

Tabla 4-5. Ponderación de factores condicionantes para flujos de detritos

Factor		Especificaciones	Rangos	
1	Pendientes de laderas	Promedio de ladera	0º - 10º	0
			10º - 15º	3
			15º - 20º	6
			20º - 25º	9
			25º - 30º	11
			30º - 40º	13
			>40º	15
2	Encajamiento canal de drenaje al pie de la ladera	Si la unidad es solo canal de drenaje, el puntaje se asocia al de “pendientes de laderas”.	<5º	1
			5º - 10º	5
			>10º	10
3	Encajamiento canal de drenaje	Un encajamiento alto puede reflejarse, entre otros, en un valor alto de esta razón.	Alto	7
			Medio	4
			Bajo	1
4	Exposición al sol	Laderas norte	Alta	3
		Laderas este – oeste	Parcial	2
		Laderas sur	Baja	0
5	Características geológicas – geotécnicas del material	Las condiciones muy favorables pueden ser, entre otros: baja densidad, baja resistencia, alta cantidad de material fino en su composición. La generación de material removible a partir de roca se ve favorecido por alta meteorización y alteración	Muy favorable	25
			Favorable	18
			Medianamente favorable	13
			Poco favorable	8
			Muy poco favorable	3
6	Condiciones de humedad y saturación	Se considera favorable una relación de profundidad de nivel freático y espesor de suelo $\frac{NF}{ES} \sim 0{,}5$	Muy favorable	10
			Favorable	7
			Poco favorable	3
			Muy poco favorable	2

Factor		Especificaciones	Rangos	
7	Acumulación de nieve	Según estacionalidad	Siempre	5
			Estacional	2
			Esporádica	1
			Nula	0
8	Cobertura vegetal	Densidad en la ladera	Nula a baja	5
			Moderada	3
			Alta	0
9	Desestabilización artificial de laderas	Por ejemplo: cortes artificiales en laderas, construcción de terraplenes, etc.	Importante	5
			Poco importante	3
			No observado	0
10	Aluviones declarados en la hoya hidrográfica	Información escrita y/u observación de depósitos de flujos en la zona de estudio. Considerar como eventos frecuentes aquellos con recurrencia <10 años.	Históricos frecuentes	10
			Históricos poco frecuentes	7
			Prehistóricos	4
			Sin antecedentes	1
11	Tipo de material	En este caso, el material roca no está en estudio, por lo tanto, pondera al resto de los factores	Suelo	1
			Roca (cobertura <1 m de suelo)	0

Fuente: Foco Ambiental, con base en Muñoz (2013) y Ceballos (2016)

5 RESULTADOS

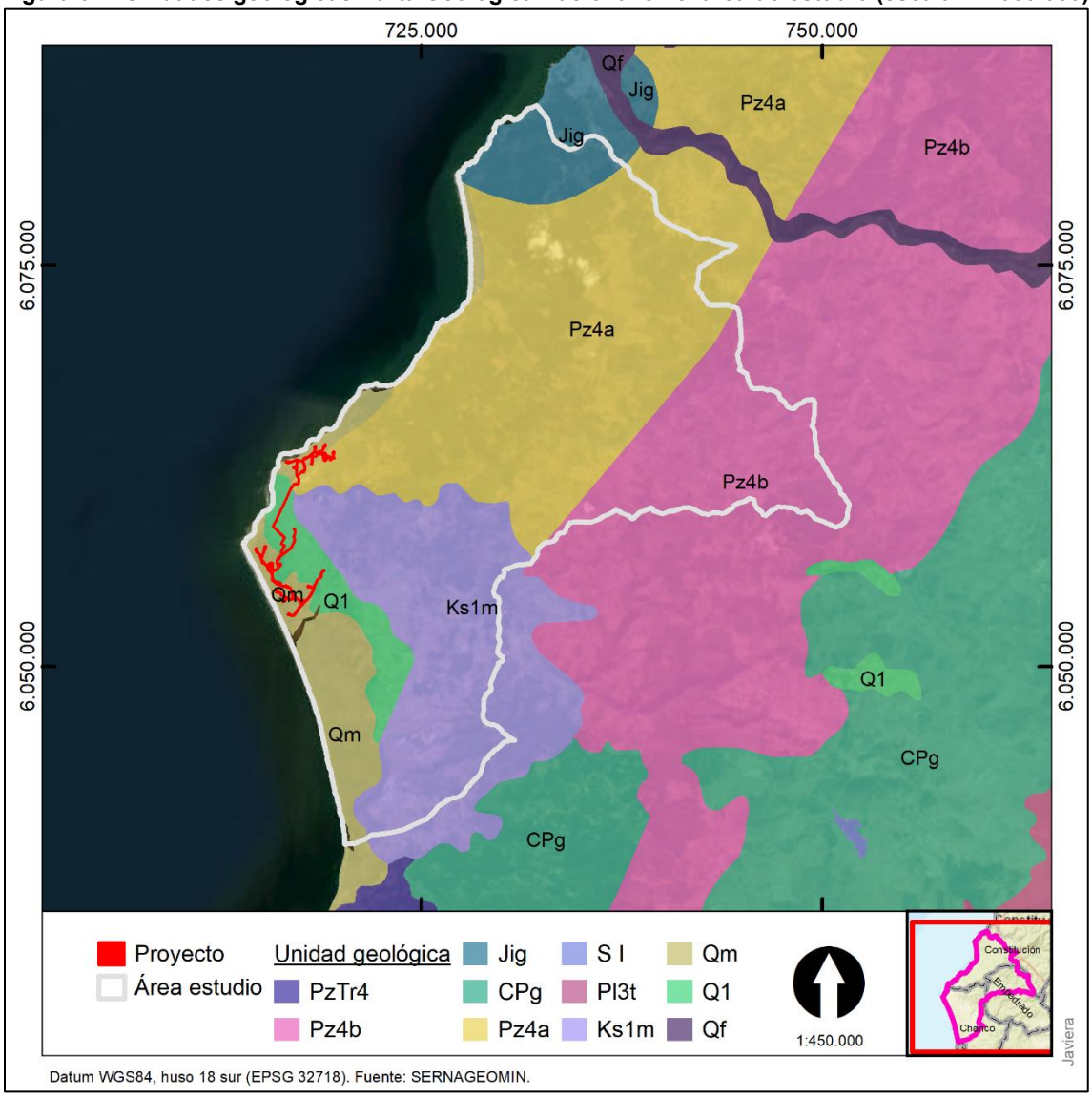
5.1 GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

5.1.1 Geología

De acuerdo con la carta geológica nacional (escala 1:1.000.000), la geología del área de influencia establecida para este componente ambiental es ilustrada en la Figura 5-1, conformada por unidades geológicas de secuencias sedimentarias (Q1, Qm, Ks1m), rocas metamórficas (Pz4a y Pz4b) y rocas volcánicas (Jig).

- Secuencias sedimentarias
    - Q1 (Pleistoceno-Holoceno). Depósitos aluviales, coluviales y de remoción en masa; en menor proporción fluvioglaciales, deltaicos, litorales o indiferenciados, con abanicos mixtos de depósitos aluviales y fluvioglaciales con intercalación de depósitos volcanoclásticos.
    - Qm (Pleistoceno-Holoceno). Depósitos litorales: arenas y gravas de playas actuales.
    - Ks1m (Cretácico Superior). Secuencias sedimentarias marinas de plataforma, litorales o transicionales: areniscas, conglomerados, lutitas, calizas extraclásticas y oolíticas, sucesiones turbidíticas.
- Rocas metamórficas
    - Pz4a (Silúrico? -Carbonífero). Esquistos muscovíticos y metabasitas, metachert y serpentinitas con metamorfismo de alto gradiente P/T Serie Occidental) y metamorfismo del Carbonífero temprano.
    - Pz4b (Silúrico? -Carbonífero). Pizarras, filitas y metaareniscas con metamorfismo de bajo gradiente P/T (Serie Oriental) del Carbonífero temprano.
- Rocas volcánicas
    - Jig (Jurásico Inferior (202-178 Ma)). Dioritas, gabros y monzodioritas de piroxeno, dioritas cuarcíferas y granodioritas y tonalitas de hornblenda y biotita.

Figura 5-1. Unidades geológicas Carta Geológica Nacional en el área de estudio (escala 1:1.000.000)



Fuente: Foco Ambiental, 2025.

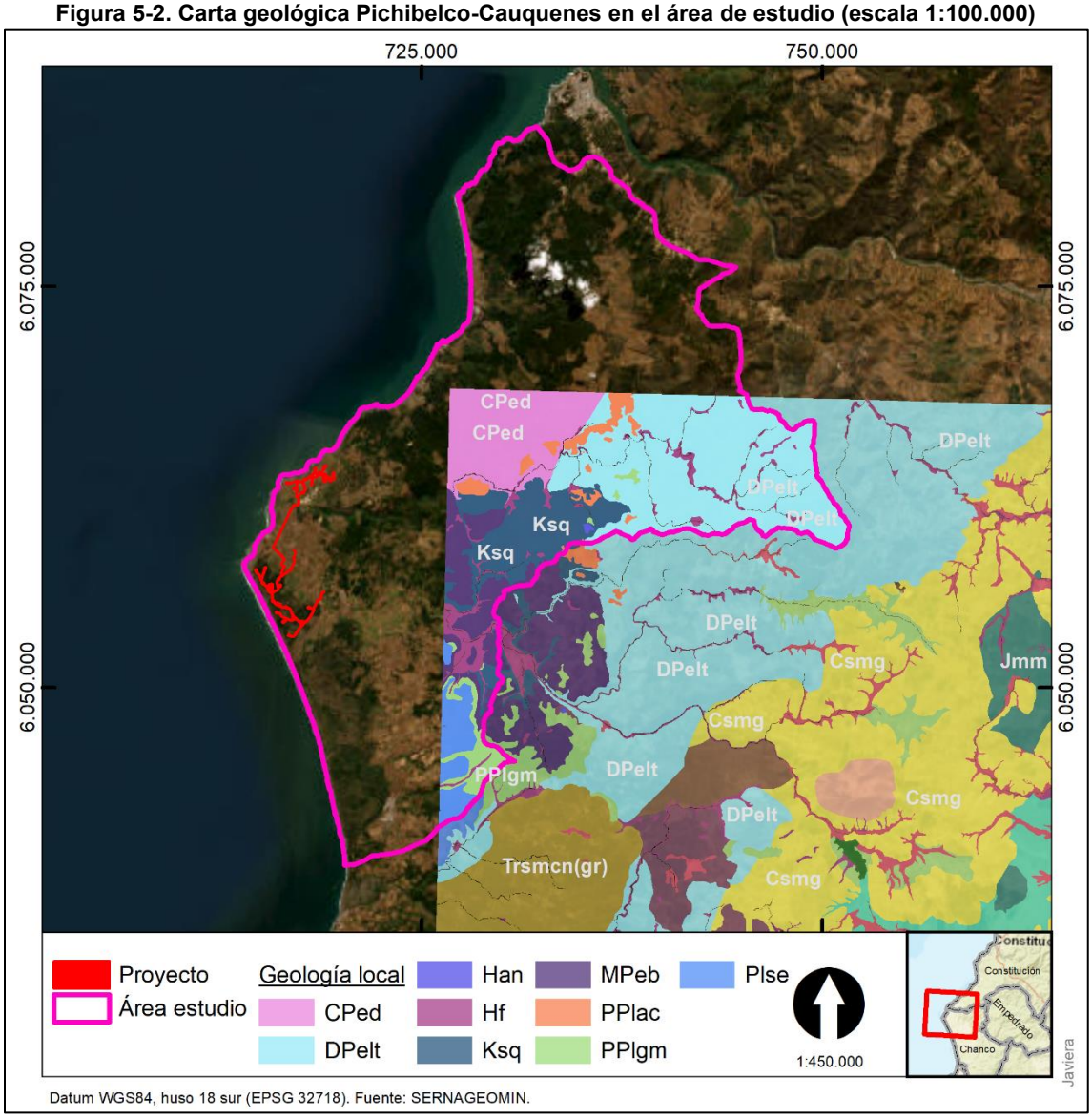
La carta Pichibelco-Cauquenes (1:100.000), presentada en la Figura 5-2, muestra la composición geológica del sector oriente de ésta, a más de 7 km del proyecto. La geología de esta zona Se conforma de la siguiente manera:

- CPed: Complejo Metamórfico Dóllimo (Protolito edad máxima: Carbonífero Inferior-Carbonífero Superior. Metamorfismo: Carbonífero Superior-Pérmico Inferior). Esquistos micáceos, filitas y pizarras subordinadas, de biotita, muscovita y cuarzo, con clorita accesoria, con texturas principalmente lepidoblásticas y porfidoblásticas, con segregaciones de cuarzo centimétricas que configuran pliegues y estructuras sigmoides, junto con rocas ultrabásicas serpentinizadas, reconocidas como cuerpos irregulares de dimensiones decamétricas junto con mineralización de talco, que podrían corresponder a intrusivos máficos. También se reconocen metapelitas, con un protolito fuertemente obliterado por metamorfismo regional.
- DPelt: Complejo Metamórfico Las Toscas (Protolito edad máxima: Devónico Medio-Carbonífero Inferior. Metamorfismo: Carbonífero Superior-Pérmico Inferior). Metapelitas micáceas y metareniscas cuarzo-feldespáticas subordinadas; pizarras, filitas y esquistos de biotita, muscovita y cuarzo de textura lepidoblástica a granolepidoblástica. Evidencias de recristalización que grada de ausente a moderada, con andalucita, y texturas entre lepidogranoblásticas y granolepidoblásticas, a intensa, con hornfels de sillimanita y cordierita de textura granoblástica en las proximidades de la unidad Monzogranito del Carbonífero Superior (Csmg).
- Han: Depósitos antrópicos (Holoceno). Desmontes y relaves, constituidos por arenas y limos, asociados al proceso de explotación de arenas silíceas, cuarzo y arcillas plásticas. Se asocian a las minas Las Piedras (arenas silíceas) y Tenequín (arcillas plásticas).
- Hf: Depósitos fluviales del Holoceno. Arenas, limos y gravas subordinadas, no consolidadas, en depósitos polimícticos y de selección variable. Se disponen en el fondo de quebradas activas y son producto de la actividad de cursos recientes de escorrentía.
- Ksq: Formación Quiriquina (Maastrichtiano Superior). Unidad sedimentaria marina compuesta por conglomerados cuarcíferos clasto- y matriz-soportados, con clastos tamaño guijarro a bolones, en su mayoría de cuarzo y, en menor medida, de filitas, pizarras y metareniscas, las que aumentan su proporción hacia la base; areniscas cuarcíferas de grano muy fino a muy grueso, eventualmente conglomerádicas, en general bien seleccionadas y con tonalidades amarillentas, grisáceas y blanquecinas; y lentes de limolitas de color gris blanquecino, finamente laminadas. En forma restringida se reconocen texturas granodecrecientes y/o granocrecientes, clastos de rezago, bases erosivas o sinuosas y relleno de canales, así como estratificación cruzada de bajo ángulo. En las limolitas se identifica-ron tanto los icnofósiles Ophiomorpha isp., Thalassinoides isp. y Skolithos isp. así como bivalvos y amonites sp. en capas de areniscas finas.
- MPeb: Estratos del Estero Batuco (Mioceno Inferior-Plioceno?). Unidad sedimentaria marina formada por capas de areniscas de grano fino a medio y localmente grueso, de colores pardo, amarillento, rojizo y gris verdoso, con estratificación cruzada planar y en artesa, laminación paralela y flautas, e intercalaciones de lentes de conglomerados y limolitas subordinadas. En sectores específicos, las capas presentan bioturbaciones, trazas fósiles y escasos gastrópodos y bivalvos, y están constituidas principalmente por granos de cuarzo con proporciones variables de fragmentos de cristales de biotita y/o muscovita, líticos de rocas metasedimentarias o volcánicas porfíricas y, en menor medida, feldespatos argilizados

y posibles clastos graníticos. Su compactación es baja a moderada, con granos habitualmente con contactos puntuales y cemento de óxidos de hierro en sus bordes, y solo de manera puntual presentan contactos del tipo cóncavo-convexo.

- PPlac: Depósitos aluviales y coluviales del Plioceno-Pleistoceno (Plioceno? -Pleistoceno?). Gravas cuarcíferas, oligomícticas y de manera subordinada polimícticas, de guijarros, con clastos de cuarzo y litologías metamórficas, mal seleccionadas; y de arenas finas a medias, formadas principalmente por granos de cuarzo y feldespato, a veces junto a clastos líticos metamórficos, con intercalaciones de capas o lentes de limos grises. Localmente, estas litologías se reconocen como bloques métricos dispersos en la superficie, de conglomerados y areniscas cuarcíferas, cementados por óxidos de hierro y sílice, probablemente debido a procesos locales de edafización.
- PPlgm: Estratos de El Guindo - Mieres (Plioceno? - Pleistoceno Medio?). Gravas y arenas, polimícticas, de origen fluvial y aluvial. Las gravas son clastosoportadas y localmente matriz-soportadas, y tienen un predominio de clastos porfíricos de origen volcánico, los que presentan de manera local una intemperización moderada (bordes alterados) a intensa (núcleo de clastos alterado). Las arenas son de grano fino a medio y están conformadas, principalmente, por clastos volcánicos y fragmentos de cristales de plagioclasa y cuarzo.
- Plse: Depósitos eólicos del Pleistoceno Superior. Arenas polimícticas finas a medias, de colores gris y pardo, con estratificación cruzada planar y en artesa o sin estructuras sedimentarias reconocibles, constituidas por proporciones variables de granos de cuarzo, feldespatos argilizados y líticos polimícticos, algunos de ellos oxidados.

Figura 5-2. Carta geológica Pichibelco-Cauquenes en el área de estudio (escala 1:100.000)

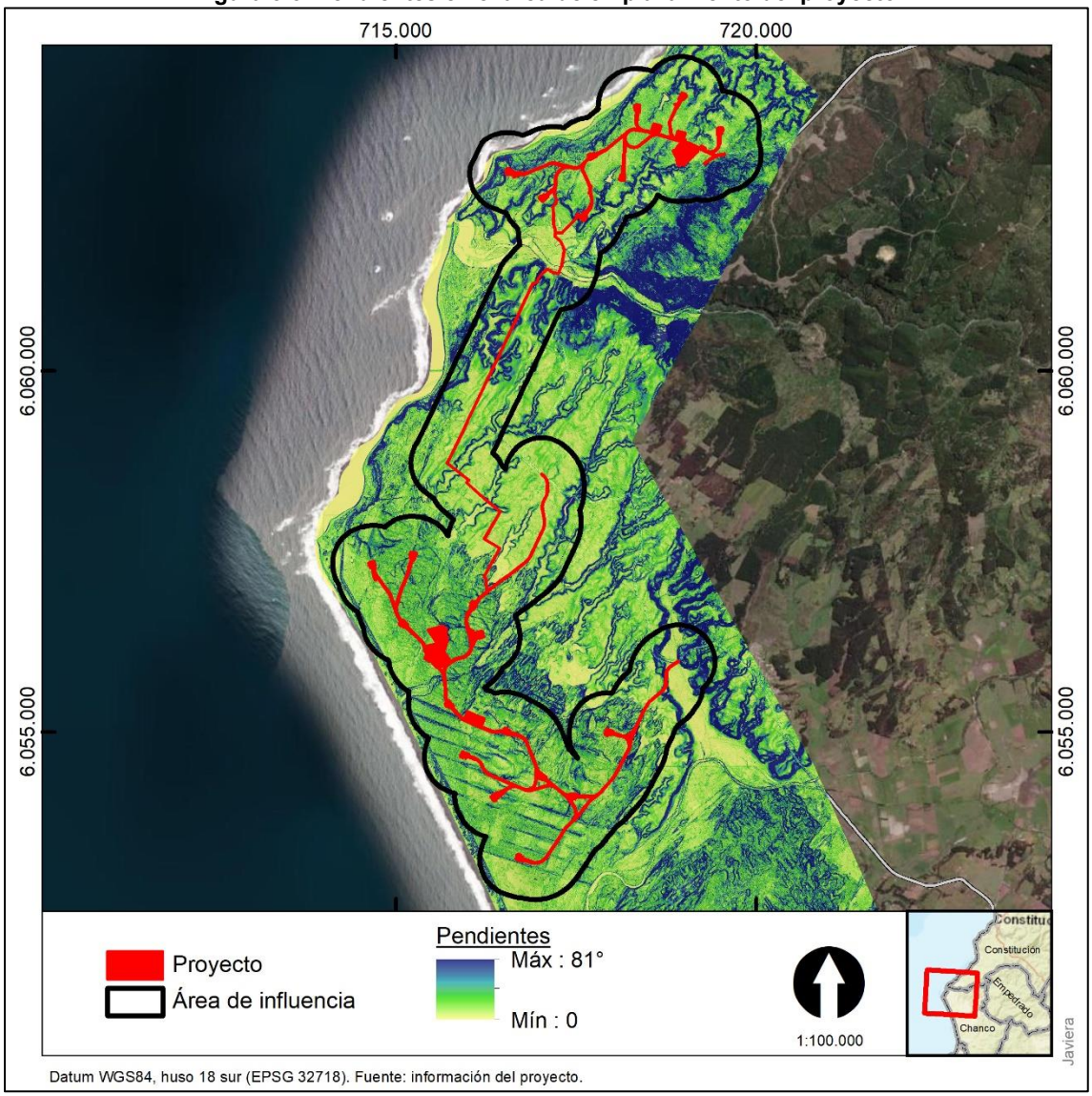


Fuente: Foco Ambiental, 2025.

5.1.2 Geomorfología

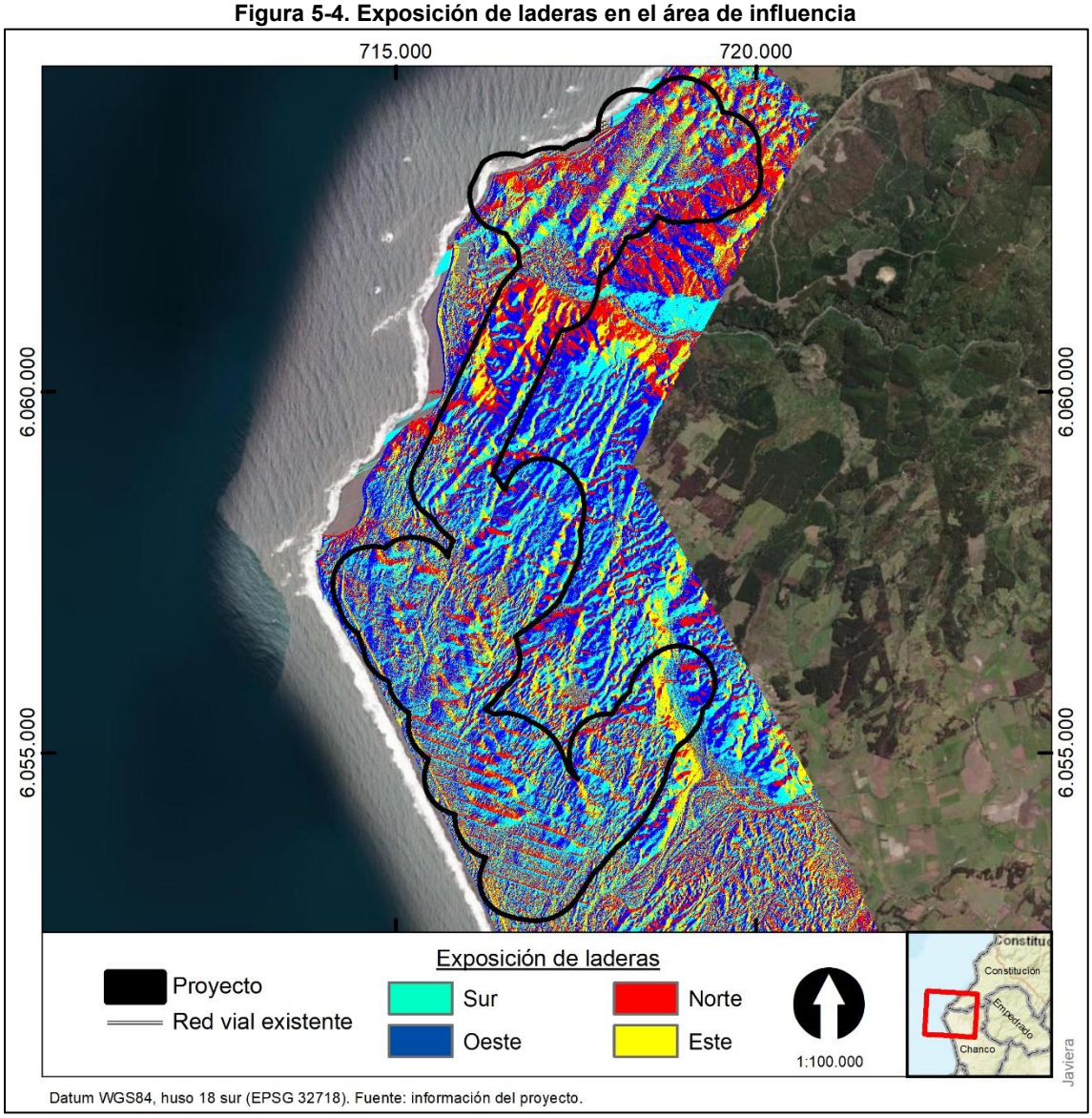
A partir del modelo digital de terreno (DTM) levantado por el Titular del proyecto, se han obtenido las pendientes y la exposición de laderas de la geografía local, dentro del área de estudio. El área de influencia presenta pendientes suaves, interrumpidas por otras más definidas, especialmente en torno al río Pinotalca, donde superan los 30° (Figura 5-3). La zona de pendientes más bajas presenta laderas variadas, en tanto la zona del río Pinotalca presenta pendientes norte y sur (Figura 5-4).

Figura 5-3. Pendientes en el área de emplazamiento del proyecto



Fuente: Foco Ambiental, 2025.

Figura 5-4. Exposición de laderas en el área de influencia

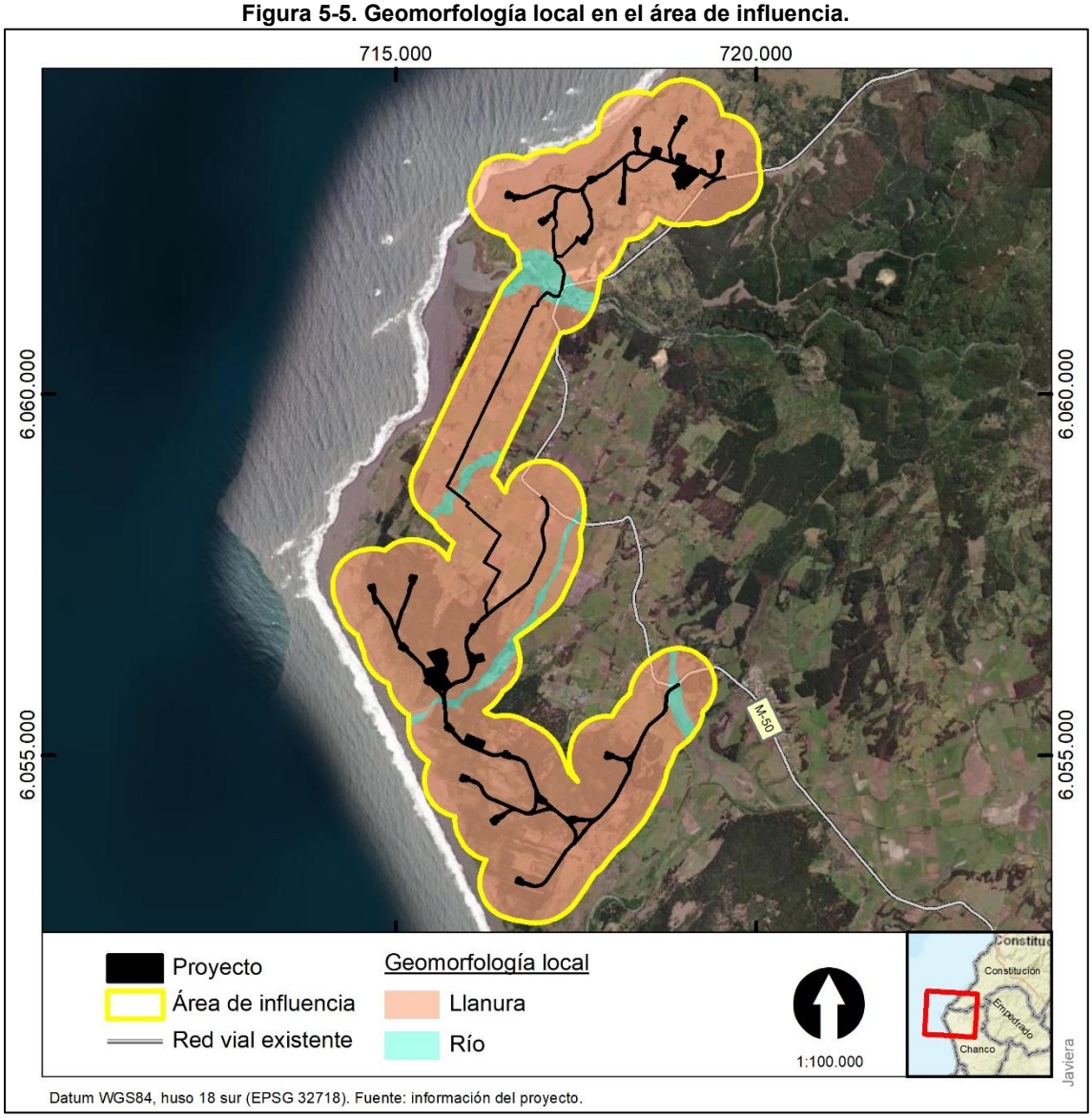


Fuente: Foco Ambiental, 2025.

A partir de esta información, se han definido dos zonas geomorfológicas locales:

- Llanura: superficie de pendientes suaves, con exposición diversa.
- Ríos: correspondiente a los cursos de agua, incluyendo los ríos Pinotalca y Reloca.

Figura 5-5. Geomorfología local en el área de influencia.



Fuente: Foco Ambiental, 2025.

5.2 RIESGO DE REMOCIÓN EN MASA

En relación con el emplazamiento del proyecto, los riesgos asociados se enfocan en sismos, tsunamis, y remoción en masa.

Desde el punto de vista de las potenciales amenazas naturales presentes en la zona donde se ubicará el Proyecto, se ha contemplado describir la variable de remoción en masa.

Teniendo en consideración que los fenómenos de remoción en masa son, de acuerdo con la definición de Hauser (1993), procesos de movilización lenta o rápida de determinado volumen de suelo, roca o ambos, en diversas proporciones, generados por una serie de factores, la metodología utilizada, consideró como factores relevantes la determinación del material involucrado (roca o suelo), el tipo de susceptibilidad litológica del material a remover, y la pendiente dominante.

5.2.1 Trabajo de gabinete: levantamiento bibliográfico

5.2.1.1 Remoción en masa

El término remoción en masa ha sido definido por Cruden y Varnes (1996), y actualizado por Hungr *et al.* (2013), como procesos de movilización lenta o rápida de determinado volumen de suelo, roca, o ambos, en diversas proporciones, generados por distintos factores, correspondiendo intrínsecamente a procesos gravitacionales, considerando que una porción específica del conjunto del terreno se desplaza hasta una cota o nivel inferior al original. Algunos movimientos en masa son lentos, a veces imperceptibles y difusos, en tanto que otros pueden desarrollar velocidades altas y pueden definirse con límites claros, determinados por superficies de rotura (Glade y Crozier, 2005). Al respecto, se identifican diversos tipos de remoción en masa por considerar (Tabla 5-1). Además, la Tabla 5-2 presenta la escala de velocidad de remoción en masa, desde 1 (extremadamente lento) a 7 (extremadamente rápido)

Tabla 5-1. Clasificación de remociones en masa (Varnes, 1978)

<table>
<tr><th colspan="2">Tipo de movimiento</th><th colspan="3">Tipo de material</th></tr>
<tr><td colspan="2">Caída</td><td rowspan="6">Roca</td><td colspan="2" rowspan="2">Suelo</td></tr>
<tr><td colspan="2">Toppling</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Deslizamiento</td><td>Rotacional</td><td rowspan="2">Grano grueso
(detritos, <80% partículas <2mm)</td><td rowspan="2">Grano fino
(barros, >80% partículas <2mm)</td></tr>
<tr><td>Traslacional</td></tr>
<tr><td colspan="2">Extensiones laterales</td></tr>
<tr><td colspan="2">Flujos</td></tr>
</table>

Fuente: Muñoz, 2013.

Tabla 5-2. Escala de velocidad de remoción en masa (Cruden y Varnes, 1996)

Clase según velocidad	Descripción	Velocidad [m/s]	Velocidad típica
7	Extremadamente rápido	5	5 m/s
6	Muy rápido	0,05	3 m/min
5	Rápido	$5x10^{-4}$	1,8 m/h
4	Moderado	$5x10^{-6}$	13 m/mes
3	Lento	$5x10^{-8}$	1,6 m/año
2	Muy lento	$5x10^{-10}$	16 mm/año
1	Extremadamente lento	$<5x10^{-10}$	<16 mm/año

Fuente: Muñoz, 2013.

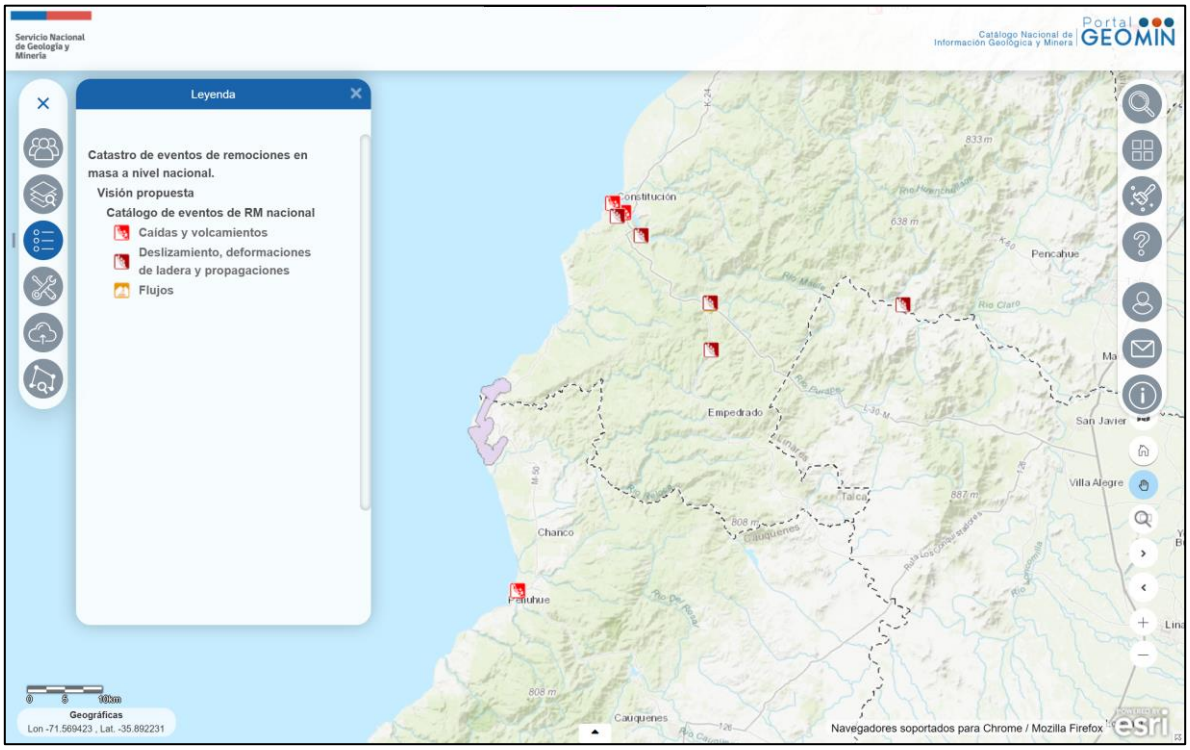
Desde el punto de vista de las potenciales amenazas naturales presentes en la zona donde se ubicará el Proyecto, se ha contemplado describir la variable de remoción en masa.

Teniendo en consideración que los fenómenos de remoción en masa son, de acuerdo con la definición de Hauser (1993), procesos de movilización lenta o rápida de determinado volumen de suelo, roca o ambos, en diversas proporciones, generados por una serie de factores, la metodología utilizada, consideró como factores relevantes la determinación del material involucrado (roca o suelo), el tipo de susceptibilidad litológica del material a remover, y la pendiente dominante.

De acuerdo con el Catastro de Remociones en Masa del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), el evento de remoción de masa más cercano al Proyecto se localiza 17 km al sur del proyecto, en Pelluhue, seguido por los eventos registrados a 26 km lineales al norte del proyecto, en la desembocadura del río Constitución. Tanto el evento de Pelluhue como algunos de los de Constitución fueron gatillados por el terremoto ocurrido el 27 de febrero de 2010.

El evento de remoción en masa registrado en Pelluhue, registrado con código RM-2013-06-003, se trata de una caída de roca cercano al río Curanilahue, con un evento secundario de deslizamiento de roca y suelo/sedimento (código RM-NM-DES-10), ambos asociados al terremoto de 2010. En la desembocadura del río Constitución, en la ciudad del mismo nombre, se registran caídas de rocas (códigos RM-2010-01-001, RM-2010-01-002, RM-2010-01-004) y caídas de bloque/detrito/arena/limo (código RM-2010-01-003), asociadas al mismo terremoto. Aguas arriba del río Constitución se registran además deslizamientos de suelo/sedimento de origen indeterminado (RM-2018-05-002).

Figura 5-6. Catastro Nacional de Remociones en Masa.



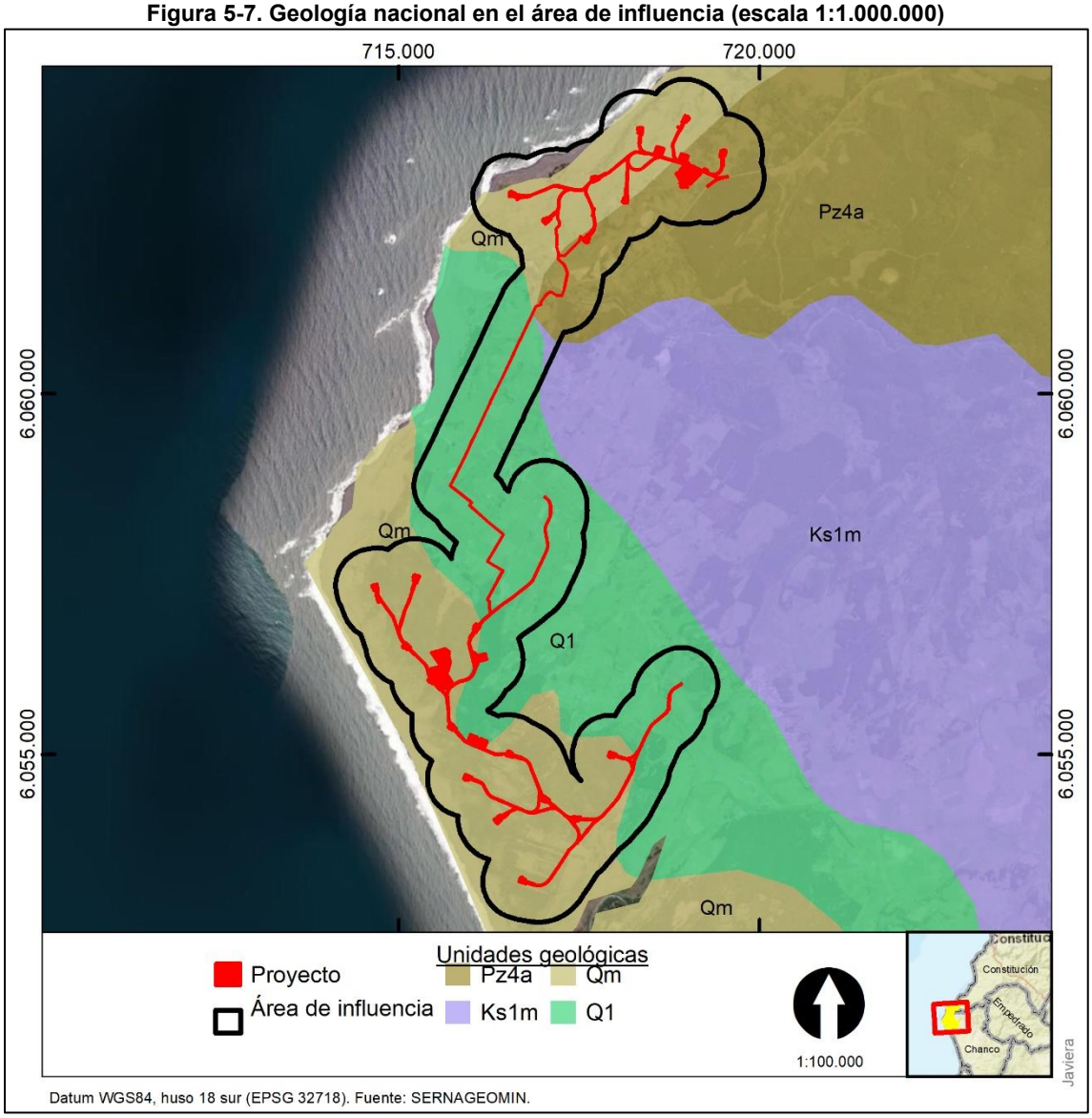
Fuente: SERNAGEOMIN, 2025.

5.2.1.2 Factores condicionantes

a) Geología y Geomorfología

El área de influencia del proyecto no cuenta con una carta geológica local; sin embargo, con respecto a la carta geológica nacional (escala 1:1.000.000), la geología del área de influencia establecida para este componente ambiental es conformada principalmente por unidades geológicas de secuencias sedimentarias (Q1, Qm), y en menor medida, por rocas metamórficas (Pz4a), esta última en el sector norte del proyecto.

Figura 5-7. Geología nacional en el área de influencia (escala 1:1.000.000)

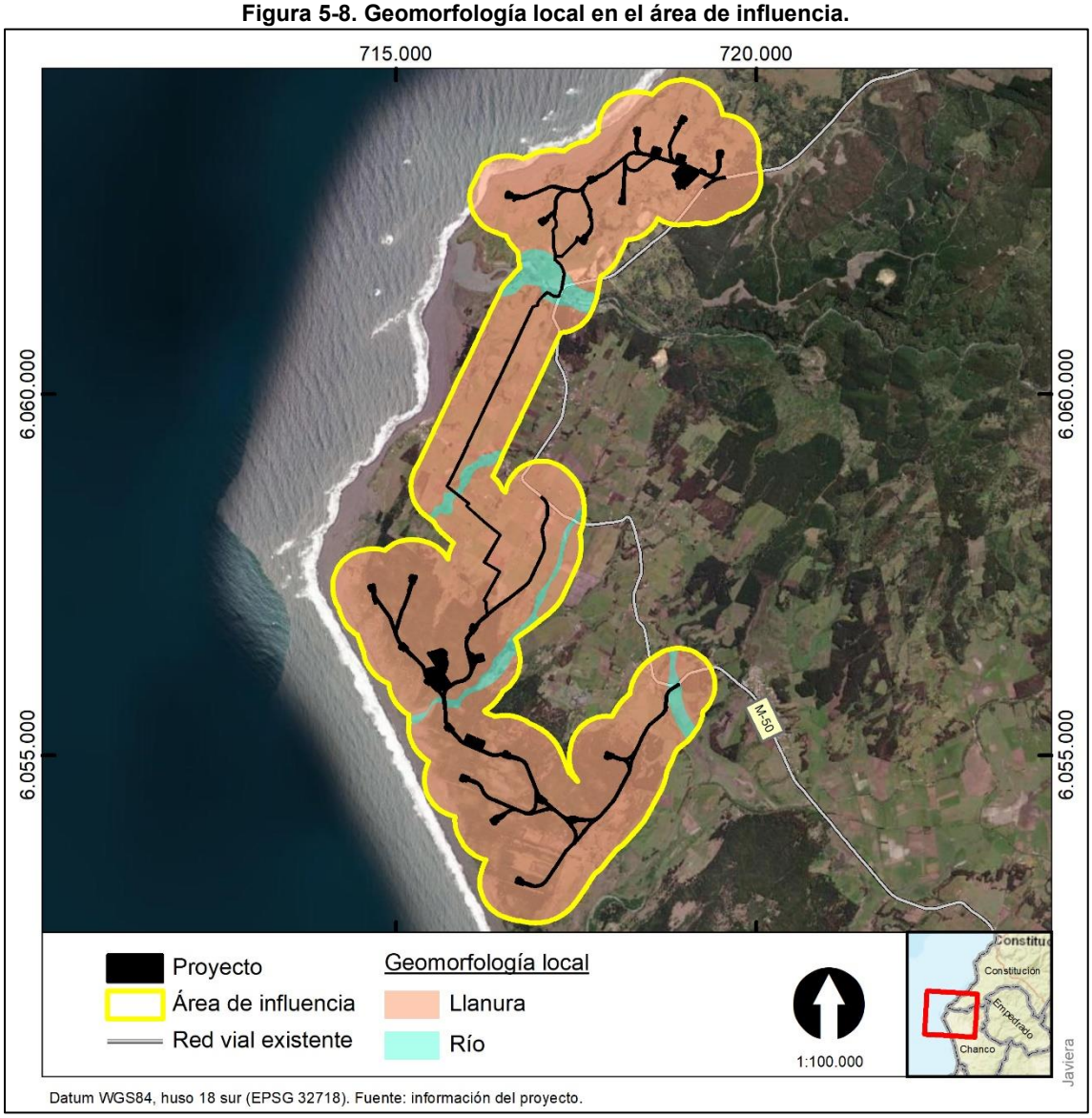


Fuente: Foco Ambiental, 20025, con base en SERNAGEOMIN, (2006).

Por otra parte, se han definido dos zonas geomorfológicas locales, correspondientes a:

- Llanura: superficie de pendientes suaves, con exposición diversa.
- Ríos: correspondiente a los cursos de agua, incluyendo los ríos Pinotalca y Reloca.

Figura 5-8. Geomorfología local en el área de influencia.

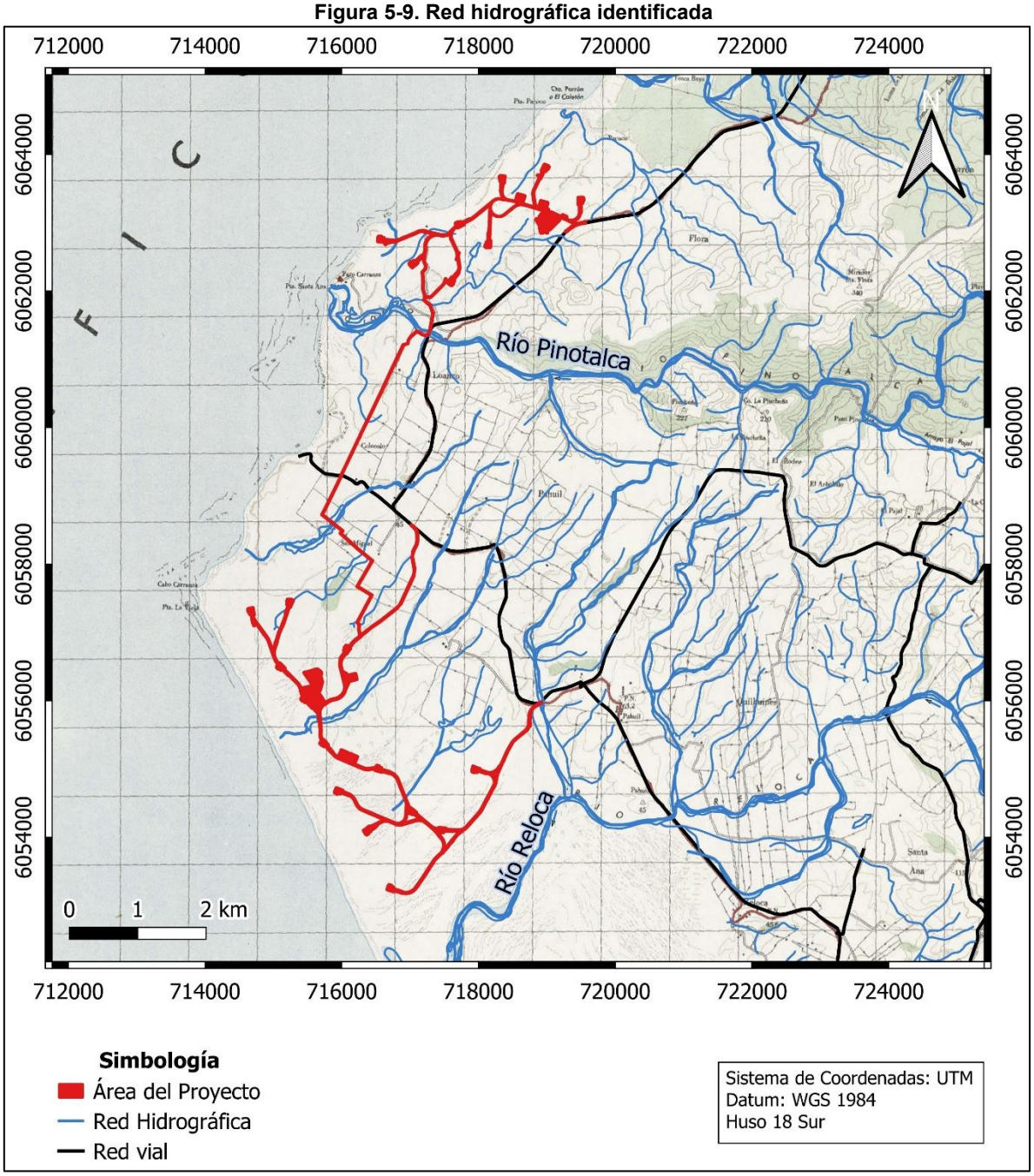


Fuente: Foco Ambiental, 2025.

b) Hidrología e hidrogeología

De acuerdo indica el anexo 3.6 de este EIA, línea de base hidrológica, el proyecto se ubica al norte del río Reloca; de norte a sur, se observa que pasa por el río Pinotalca y otros cauces que corresponden a Quebradas Sin Nombre, canales, cursos de agua intermitentes, zonas de acumulación de aguas y humedales.

Figura 5-9. Red hidrográfica identificada



Fuente: Anexo 3.6 del EIA Línea de base Hidrológica, 2025.

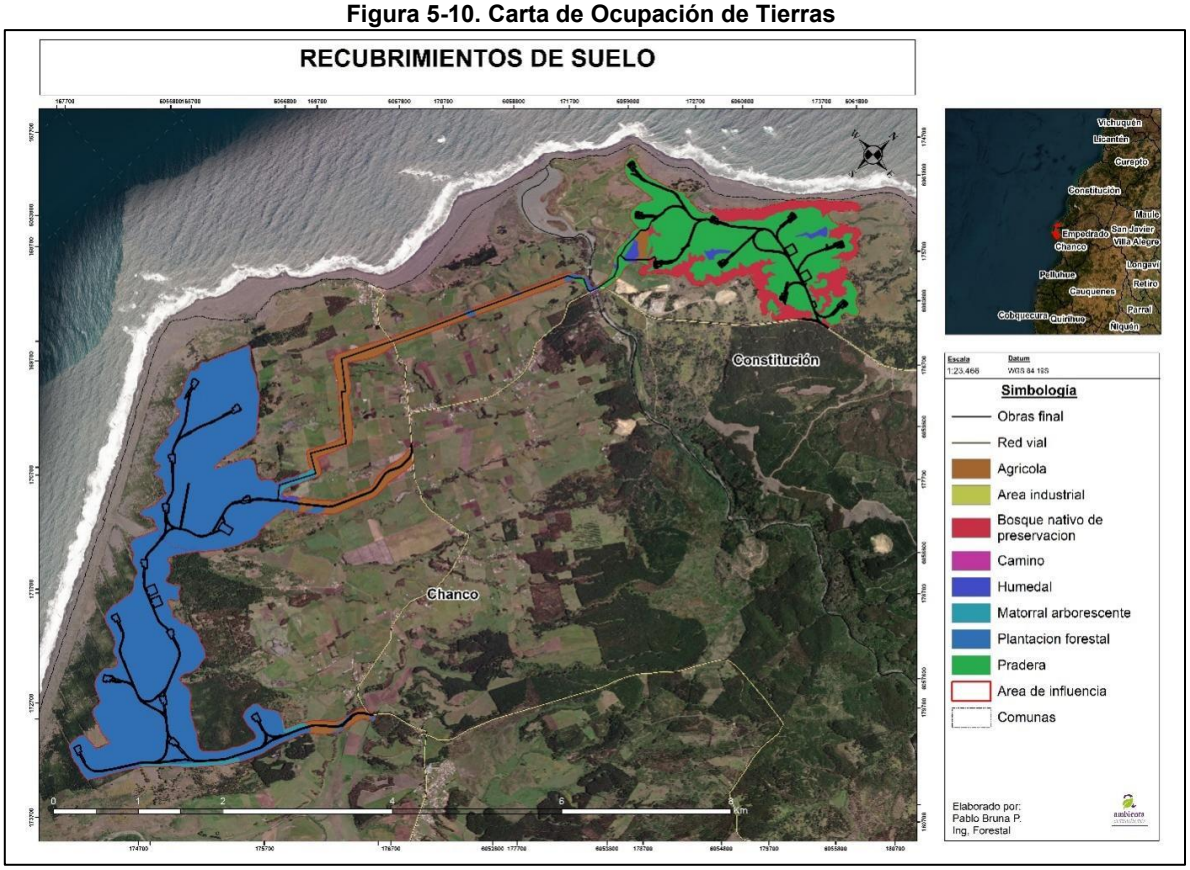
Con respecto a la hidrogeología de la zona y los niveles de agua subterránea, la línea de base hidrogeológica (anexo 3.7 del EIA) señala que, de acuerdo con la información disponible de los pozos

cercanos al Proyecto, se estima que la menor profundidad de nivel estático presente es de 0,6 metros, correspondiente a la zona del aerogenerador P12.

c) Vegetación

La línea de base de flora y vegetación (anexo 3.8 del EIA) da cuenta de una superficie de alta cobertura vegetacional, salvo por sectores acotados, intervenidos por caminos e industria, como presenta la siguiente figura:

Figura 5-10. Carta de Ocupación de Tierras



Fuente: Anexo 3.8 del EIA Línea de base de Flora y vegetación, 2025.

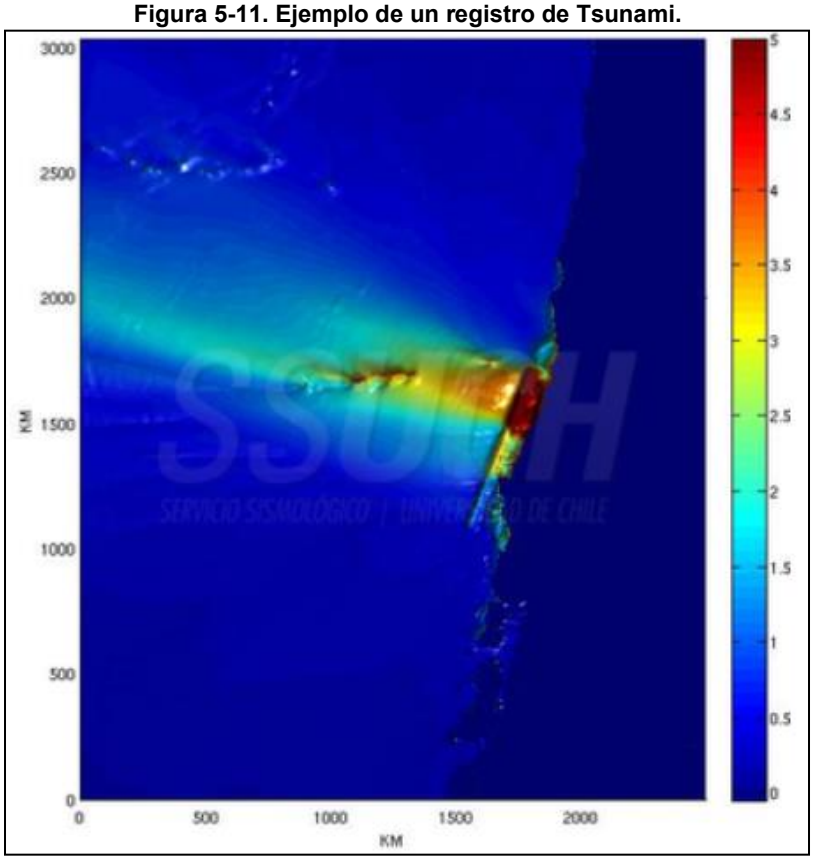
5.2.1.3 Factores gatillantes

a) Sismicidad

De acuerdo con la información disponible en el Centro de sismología Nacional de la Universidad de Chile se define lo siguiente:

"Sismo: Corresponde al proceso de generación de ondas y su posterior propagación por el interior de la Tierra. Al llegar a la superficie de la Tierra, estas ondas se dejan sentir tanto por la población como por estructuras, y dependiendo de la amplitud del movimiento (desplazamiento, velocidad y aceleración del suelo) y de su duración, el sismo producirá mayor o menor intensidad.

Figura 5-11. Ejemplo de un registro de Tsunami.



Fuente: Glosario, del Centro Sismológico Nacional (CSN).

i. Contexto sismológico nacional

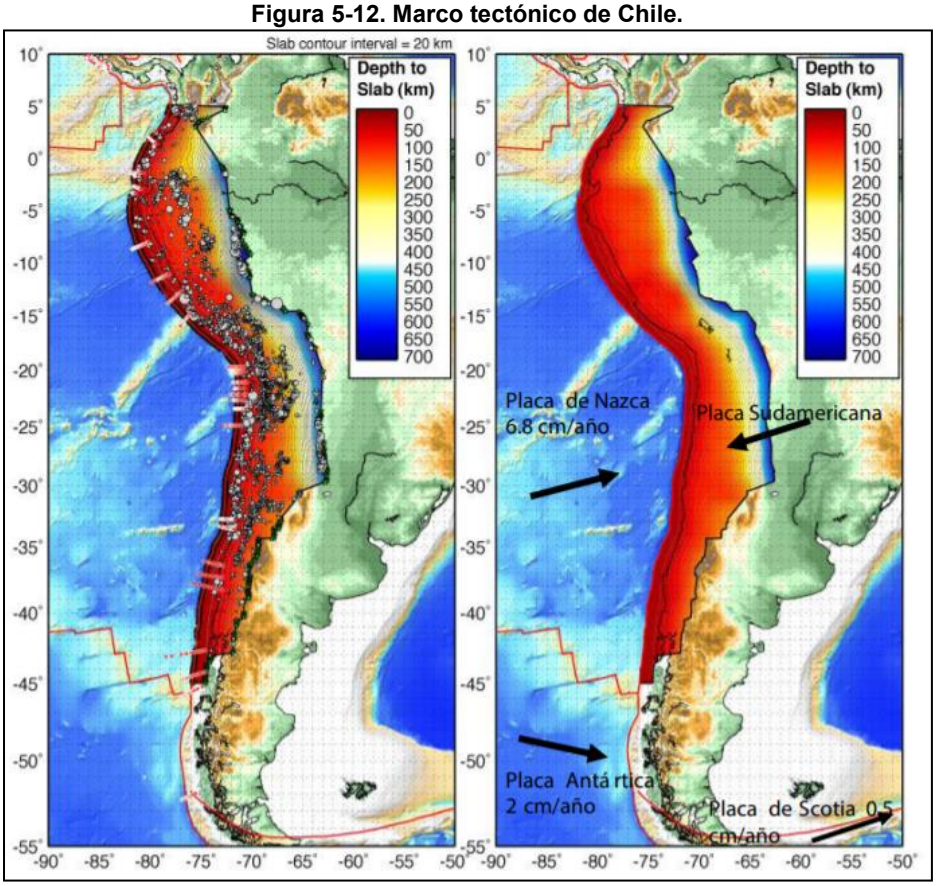
En base al contexto sismológico, el documento Sismicidad y Terremotos en Chile[1], del Centro Sismológico Nacional de la Universidad de Chile, señala que "*Chile se encuentra ubicado sobre la placa Sudamericana, en su borde occidental donde convergen y generan zonas de subducción las placas de Nazca y Antártica, en tanto que la placa de Scotia se desliza horizontalmente respecto a la placa Sudamericana, en un borde de placas transcurrente*". Estas interacciones producen una gran deformación del continente Sudamericano, y generan terremotos en todo Chile. Debido a la alta

[1] https://www.csn.uchile.cl/wp-content/uploads/2014/06/001_terremotos_y_sismicidad_chile.pdf

velocidad de convergencia entre Nazca y Sudamérica, la sismicidad en esa zona es la más intensa y produce los mayores terremotos en el país".

En la Figura 5-12 se muestra el marco tectónico de Chile, las placas que interactúa con la Placa Sudamericana, indicando la dirección y velocidad de convergencia. Los colores indican la profundidad alcanzada por la Placa de Nazca bajo la Placa Sudamericana. Los puntos de color blanco son sismos que permiten determinar la profundidad y geometría de la zona de subducción.

Figura 5-12. Marco tectónico de Chile.



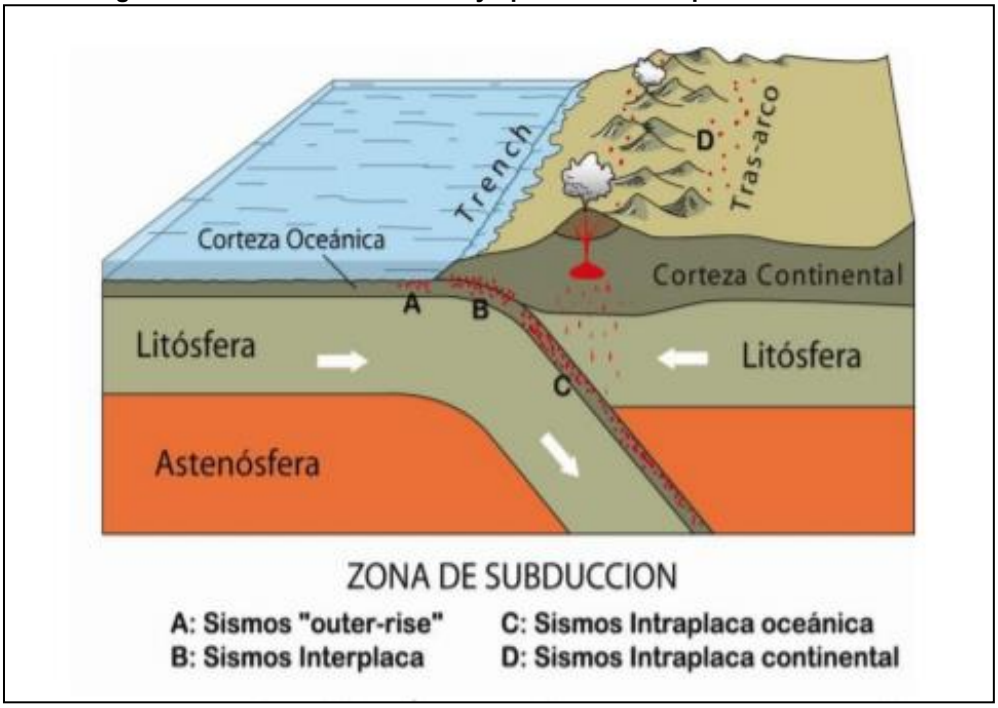
Fuente: Sismicidad y terremotos en Chile, del Centro Sismológico Nacional (CSN).

Para entender los tipos de sismos, el informe de sismología de la Universidad de Chile lo explica de la siguiente manera:

> *"Una zona de subducción ocurre en bordes de placas convergentes. La placa más densa o pesada penetra bajo la menos densa, debido al peso de la placa subductada. En estas zonas ocurren todo tipo de sismos o terremotos tectónicos (Figura 5-13).*
>
> *En el caso de las placas de Nazca y Sudamérica en Chile, la placa oceánica de Nazca, más densa que la placa continental de Sudamérica, penetra bajo el continente, formando una*

zona de subducción. El primer contacto entre las placas produce un valle profundo, llamado fosa o trinchera ("trench"), que ocurre bajo el océano costa afuera del continente".

Figura 5-13. Zona de subducción y tipos de sismos que ocurren en ella



Fuente: Sismicidad y terremotos en Chile, del Centro Sismológico Nacional (CSN).

Existen distintos tipos de sismos, los que se explican en la siguiente Tabla 5-3.

Tabla 5-3. Tipos de Sismos

Tipos de sismos	
Sismos Interplaca	La fuerza de roce entre las placas traba el movimiento entre las placas, las que se pueden mover relativamente sólo cuando la fuerza neta en la zona interplaca es mayor que la fuerza de roce entre ellas. Cada vez que logre moverse, ocurre un terremoto interplaca. El tamaño del terremoto (magnitud), es proporcional al área de la zona que logró moverse y a cuánto se movió. Si durante el movimiento (terremoto), se desplaza el fondo oceánico verticalmente, se genera una ola sobre la zona de ruptura que al propagarse en el océano se llama "tsunami". Estos son los sismos de mayor magnitud, siendo ejemplos de estos sismos el terremoto de Valdivia de 1960 (Mw=9,5), y el terremoto del Maule de 2010 (Mw=8,8).
Sismos "outer-rise"	Son sismos que ocurren costa afuera de la fosa oceánica, debido a la deformación en la placa de Nazca ("bending") al tratar de meterse bajo el continente y que el contacto interplaca no se mueve por estar acoplado (fuerza de roce mayor que la fuerza neta). En general tienen magnitudes menores que 8,0. Ejemplo de este tipo de sismos, es el terremoto de 2001 (Mw=6,7), frente a las costas de Valparaíso.

Tipos de sismos	
Sismos Intraplaca-oceánica	Son sismos que ocurren dentro de la placa oceánica subductada debido al peso de la placa y fuerte acoplamiento interplaca. Se originan a profundidades mayores que 60 km hasta la máxima profundidad en que la placa siga siendo frágil y/o que ocurran cambios de fase que originen sismos (~700 km). Los 60 km de profundidad corresponden aproximadamente a la profundidad que alcanza el contacto interplaca. El potencial de daños de estos sismos es mayor que el de los sismos interplaca de la misma magnitud. Ejemplos de estos sismos son los terremotos de Chillan en 1939 (Ms=8,3), y Punitaqui en 1997 (Mw=7,1).
Sismos Intraplaca-continental	Son sismos que ocurren dentro de la placa continental, en la corteza a profundidades menores que 30 km, debido a deformación generada principalmente por la convergencia entre las placas y por esfuerzos locales. La principal deformación generada por la subducción es el alzamiento de la cordillera de los Andes. En general, estos sismos ocurren en torno a la cordillera, tanto en Chile como en Argentina. Ejemplo de estos sismos es el terremoto de Las Melosas de 1958 (Mw=6,3), en el Cajón del Maipo frente a Santiago.

Fuente: Sismicidad y terremotos en Chile, del Centro Sismológico Nacional (CSN).

ii. Eventos históricos de grandes terremotos

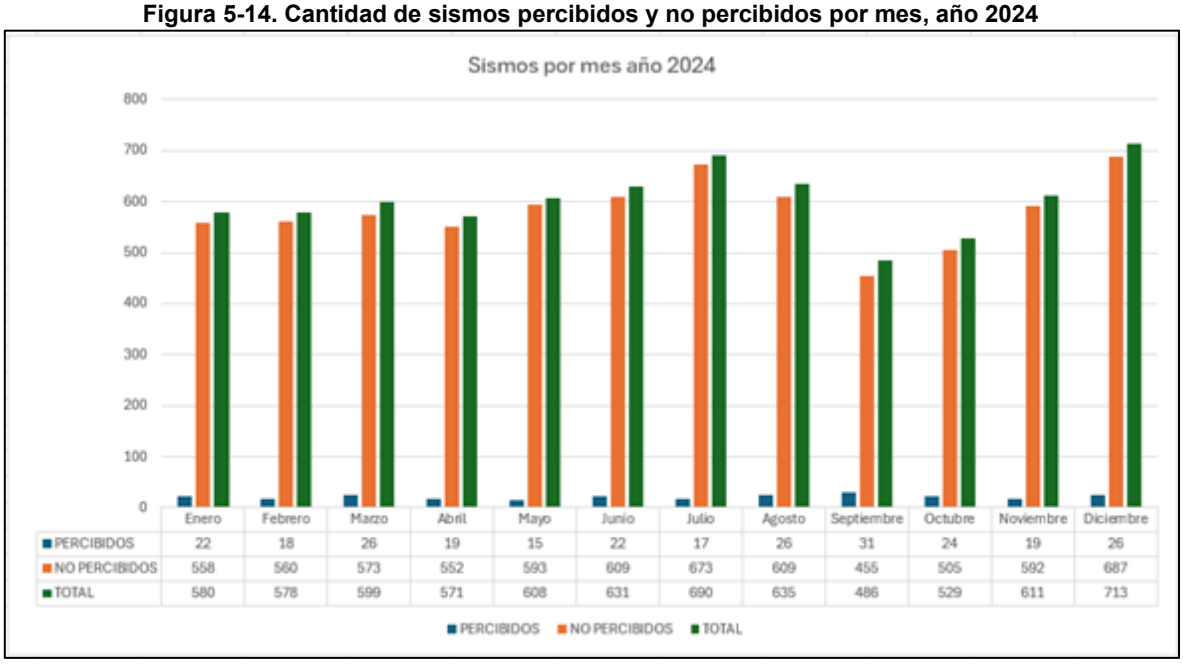
De acuerdo con la información científica de la sismología de Chile, se ha determinado *que "Las zonas más probables de generar futuros terremotos son aquellas en las cuales ha transcurrido suficiente tiempo para acumular esfuerzos desde el último gran terremoto, constituyéndose en las llamadas "gaps" o "lagunas" sísmicas[2]"*.

Durante el año 2024, el Centro Sismológico Nacional (CSN) de la Universidad de Chile localizó 7.231 sismos con magnitud cercana o superior a 3 dentro del territorio nacional, es decir, 331 sismos más que en 2023, retomando la tendencia de registrar más de 7.000 sismos por año, tal como venía ocurriendo desde 2017. De éstos, 265 fueron reportados como "Percibidos" por el Centro de Alerta Temprana (CAT)[3] de SENAPRED.

De acuerdo presenta la Figura 5-14, la mayor cantidad de sismos a nivel nacional ha ocurrido en los meses de diciembre (713) y julio (690), mientras que la mayor cantidad de sismos percibidos ha sido en septiembre (31), seguido por los meses de marzo, agosto y diciembre (26 cada mes).

[2] Centro Sismológico Nacional, Universidad de Chile.
[3] A partir del 1 de enero de 2023, la Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior (ONEMI) ha sido reemplazada por el Servicio de Prevención y Respuesta ante Desastres (SENAPRED).

Figura 5-14. Cantidad de sismos percibidos y no percibidos por mes, año 2024

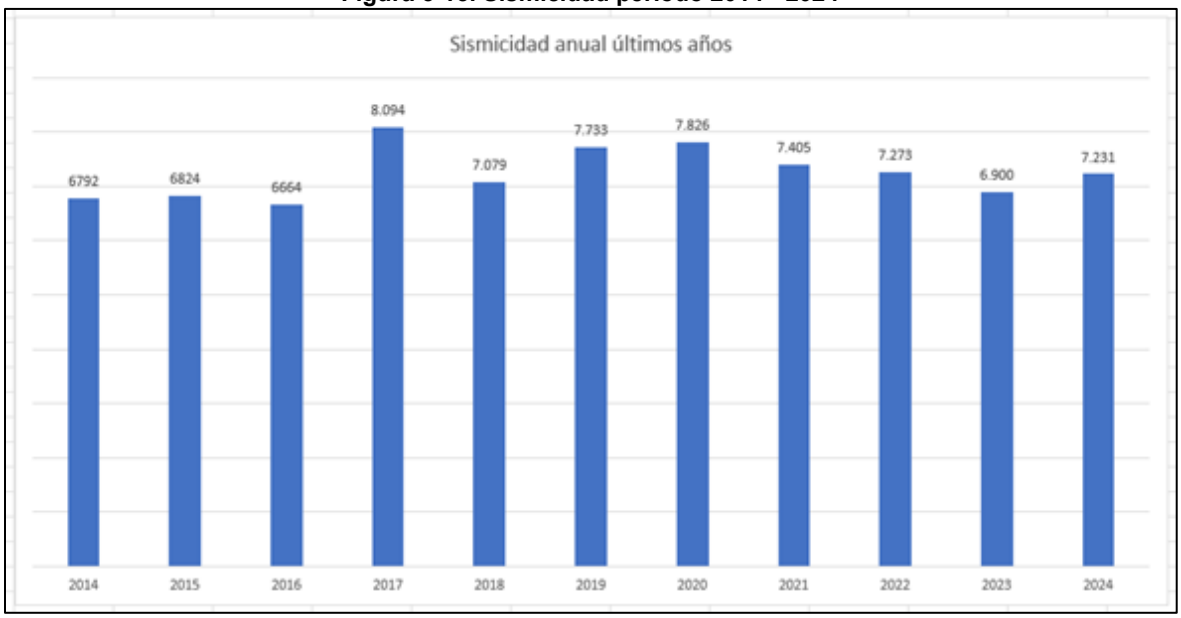


	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
PERCIBIDOS	22	18	26	19	15	22	17	26	31	24	19	26
NO PERCIBIDOS	558	560	573	552	593	609	673	609	455	505	592	687
TOTAL	580	578	599	571	608	631	690	635	486	529	611	713

Fuente: Centro Sismológico Nacional (CSN), Universidad de Chile, 2025.

Con respecto a la sismicidad en los últimos siete años (Figura 5-15), se observa que en 2024 se ha retomado la tendencia de registrar más de 7.000 sismos al año, como ocurrió en el período 2017-2022.

Figura 5-15. Sismicidad período 2014 - 2024



Fuente: Centro Sismológico Nacional (CSN), Universidad de Chile, 2025.

La Tabla 5-4 presenta los 15 sismos de mayor magnitud registrados en 2024, con valores entre 5,4 y 7,4.

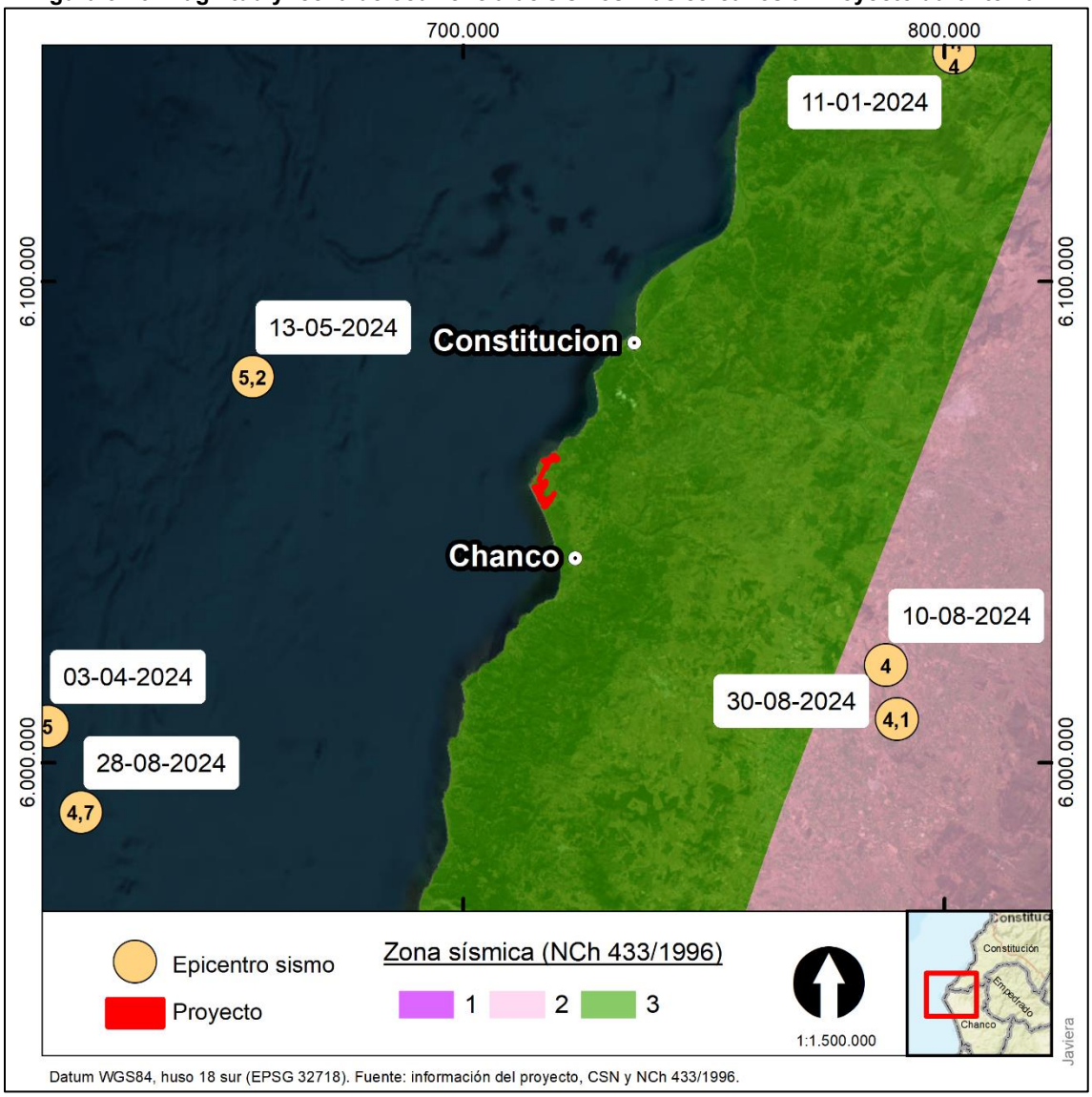
Tabla 5-4. Sismos con magnitud mayor localizados por el CSN en 2024.

Ubicación	Fecha	Profundidad (Kms.)	Magnitud
26 km al SE de San Pedro de Atacama	19 de julio de 2024	145	7.4
52 km al SE de Curicó	13 de diciembre de 2024	114	6.3
14 km al SO de Cabo Raper	08 de noviembre de 2024	10	6.2
160 km al E de San Juan	21 de septiembre de 2024	135	6.0
156 km al NO de La Rioja	24 de diciembre de 2024	126	6.0
54 km al SO de Huasco	14 de febrero de 2024	45	5.8
91 km al E de Alto del Carmen	06 de septiembre de 2024	128	5.7
80 km al NO de San Juan	20 de octubre de 2024	125	5.7
114 km al E de Colchane	05 de septiembre de 2024	239	5.6
131 km al E de Alto del Carmen	03 de enero de 2024	159	5.5
214 km al S de Uyuni	21 de agosto de 2024	263	5.5
27 km al NO de Huasco	11 de febrero de 2024	44	5.4
27 km al O de Visviri	12 de julio de 2024	167	5.4
75 km al NO de Lebu	18 de agosto de 2024	24	5.4
20 km al N de La Serena	23 de septiembre de 2024	65	5.4

Fuente: Centro Sismológico Nacional (CSN), Universidad de Chile, 2025.

La Figura 5-16 presenta el epicentro de los sismos registrados durante 2024 con epicentro cercano al proyecto, junto con su magnitud y fecha de ocurrencia, así como las zonas sísmicas que establece la Norma Chilena NCh 433. De acuerdo con esta información, el proyecto se emplaza en la zona sísmica 3, es decir, de menor aceleración, observándose eventos sísmicos tanto en la zona 2 (aceleración intermedia) como en el océano Pacífico con magnitudes de entre 4,0 a 5,2, ocurridos en los meses de abril, mayo y agosto. El sismo de mayor magnitud en cercanías del proyecto es, a la vez, el más cercano a éste, y ocurrió el día 13 de mayo de 2024, con magnitud 5,2, con epicentro en el Océano Pacífico, a 79 km al oeste de la costa chilena, entre Constitución y Chanco.

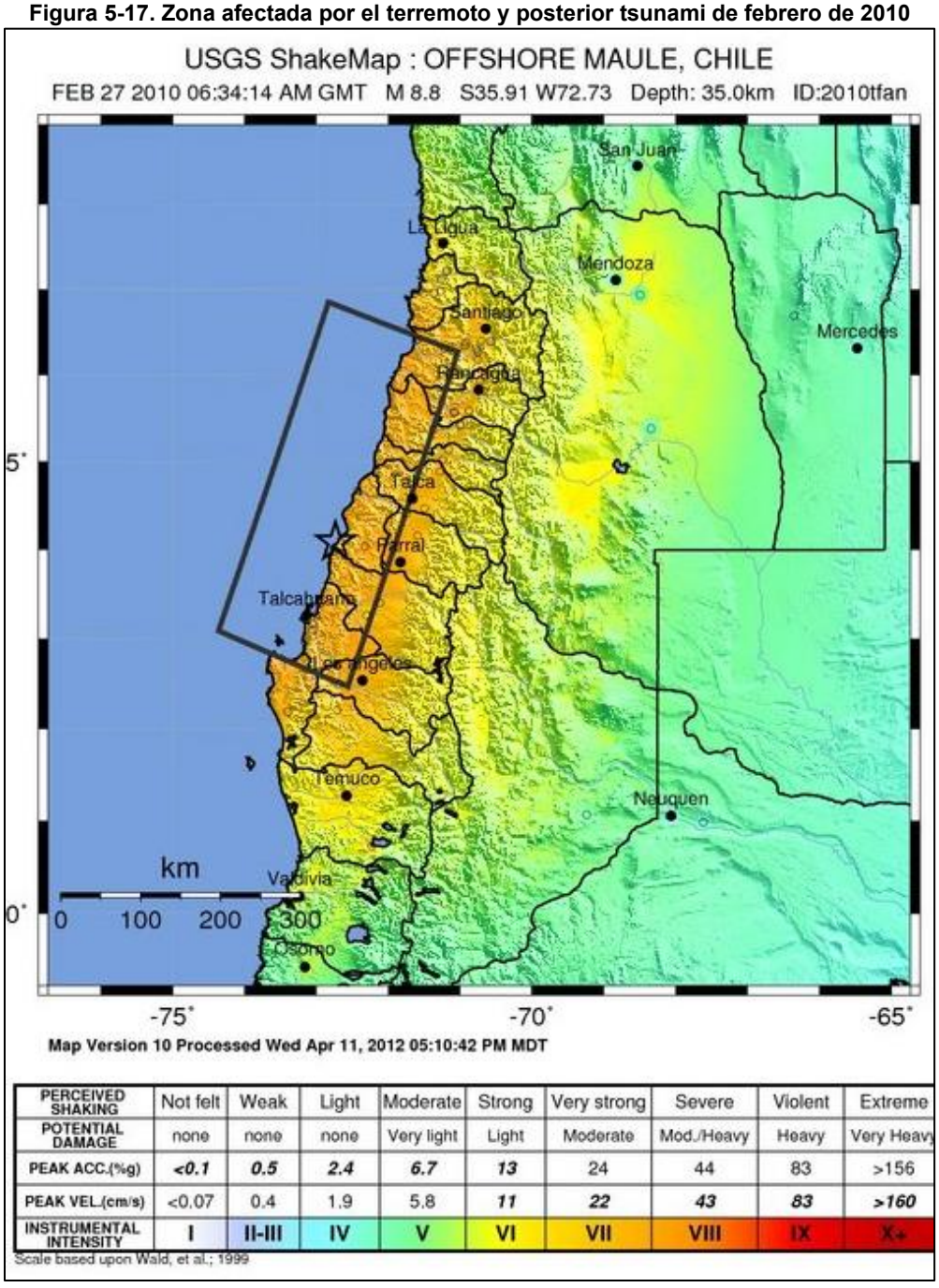
Figura 5-16. Magnitud y fecha de ocurrencia de sismos más cercanos al Proyecto durante 2024



Fuente: Foco Ambiental, 2025, con base en Centro Sismológico Nacional (CSN) y Norma Chilena 433.

Uno de los eventos sísmicos más relevantes en la zona es el terremoto ocurrido el sábado 27 de febrero de 2010, a las 3.34 de la mañana, siendo este uno de los sismos más fuertes registrados en el mundo, de 8,8 MW magnitud Ritcher, con epicentro en el Océano Pacífico, frente a las costas de Constitución. Este sismo se originó debido al desplazamiento súbito de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana en un área que se extiende aproximadamente desde la Península de Arauco por el sur hasta el norte de Pichilemu, cubriendo unos 450 km de longitud en dirección prácticamente norte-sur por un ancho de unos 150 km.

Figura 5-17. Zona afectada por el terremoto y posterior tsunami de febrero de 2010



Fuente: Desastres en la memoria, de SENAPRED.

Por lo tanto, los registros sismológicos recientes permiten asegurar que se trata de una zona sin lagunas sísmicas.

b) Precipitaciones

El anexo 3.06 de este EIA, correspondiente a la línea de base de Hidrología, la que ha recopilado los valores de precipitaciones registrada por la estación meteorológica La Estrella, entre 1992 y 2025 (Tabla 5-5).

Tabla 5-5. Precipitación máxima en 24 horas, estación La Estrella

Año	Fecha	P_{24} (mm)	Año	Fecha	P_{24} (mm)	Año	Fecha	P_{24} (mm)
1992	16/09	55,60	2004	21/07	56,50	2016	13/07	30,20
1993	16/04	37,60	2005	26/06	66,50	2017	24/06	62,00
1994	19/07	52,00	2006	11/07	72,50	2018	13/12	5,60
1995	15/06	52,50	2007	12/07	46,50	2019	27/06	43,60
1996	11/06	54,00	2008	19/05	74,50	2020	18/07	58,90
1997	19/06	68,50	2009	18/06	55,50	2021	01/05	64,50
1998	10/09	35,50	2010	13/06	55,50	2022	-	-
1999	04/09	57,00	2011	18/06	66,70	2023	-	-
2000	09/09	81,50	2012	26/05	75,00	2024	03/11	4,90
2001	16/07	69,50	2013	02/05	46,00	2025	14/06	46,20
2002	23/08	83,50	2014	03/06	43,40			
2003	20/05	55,50	2015	11/07	61,60			

Fuente: Anexo 3.6 del EIA Línea de base Hidrológica, 2025.

La Tabla 5-6 entrega el resumen del set de precipitaciones máximas en 24 horas (mm), así como la máxima diaria (mm) para diferentes periodos de retorno.

Tabla 5-6. Precipitaciones máximas para 24 horas y diferentes periodos de retornos

Periodo de retorno T (años)	Pp máxima 24 horas (mm)	Pp máxima diaria (mm)
2	54,3	59,8
5	69,6	76,6
10	77,6	85,4
25	86,1	94,7
50	91,6	100,8
100	96,6	106,2
150	99,3	109,2

Fuente: Anexo 3.6 del EIA Línea de base Hidrológica, 2025.

Considerando los efectos del cambio climático, se proyectan disminuciones en las precipitaciones de la zona en un 9,5% para el período 2035-2065, lo cual significa una disminución equivalente en los caudales de crecida estimados, acorde al criterio de evaluación del SEIA.

En base a los datos sobre cambio climático presentados en la base de datos de ARClim, se destaca el aumento constante y considerable en la frecuencia de sequías, acompañadas de eventos de lluvias torrenciales puntuales de magnitudes por sobre los 150 mm y fuertes vientos de más de 10 m/s.

5.2.2 Resultados prospección de terreno

La información de terreno ha sido recopilada durante la realización de las campañas realizadas para la línea de base de hidrología (anexo 3.6 del EIA) y de flora y vegetación (anexo 3.8 del EIA).

5.2.3 Trabajo de gabinete: Riesgo de remoción en masa

A partir de la información levantada, tanto bibliográfica como en terreno, se presenta la evaluación de la susceptibilidad de remociones en masa: deslizamiento en suelo, deslizamiento en roca, caídas de roca y flujos de detritos.

5.2.3.1 Factores condicionantes

Los factores condicionantes se han desarrollado en sus respectivas líneas de base y actualizaciones, por lo que en este informe son analizados para cada tipo de remoción en masa evaluado.

5.2.3.2 Factores gatillantes

Los factores condicionantes se han desarrollado en sus respectivas líneas de base y actualizaciones, por lo que en este informe son analizados para cada tipo de remoción en masa evaluado.

5.2.3.3 Evaluación de la susceptibilidad de remociones en masa: escenario actual

A continuación, se presenta el análisis de la susceptibilidad de remociones en masa de acuerdo con la metodología señalada, para el escenario actual.

a) Evaluación de la susceptibilidad a deslizamiento en suelo

Las áreas con desarrollo de suelo son las zonas correspondientes a Llanura, por lo que el análisis se aplica sobre éstas.

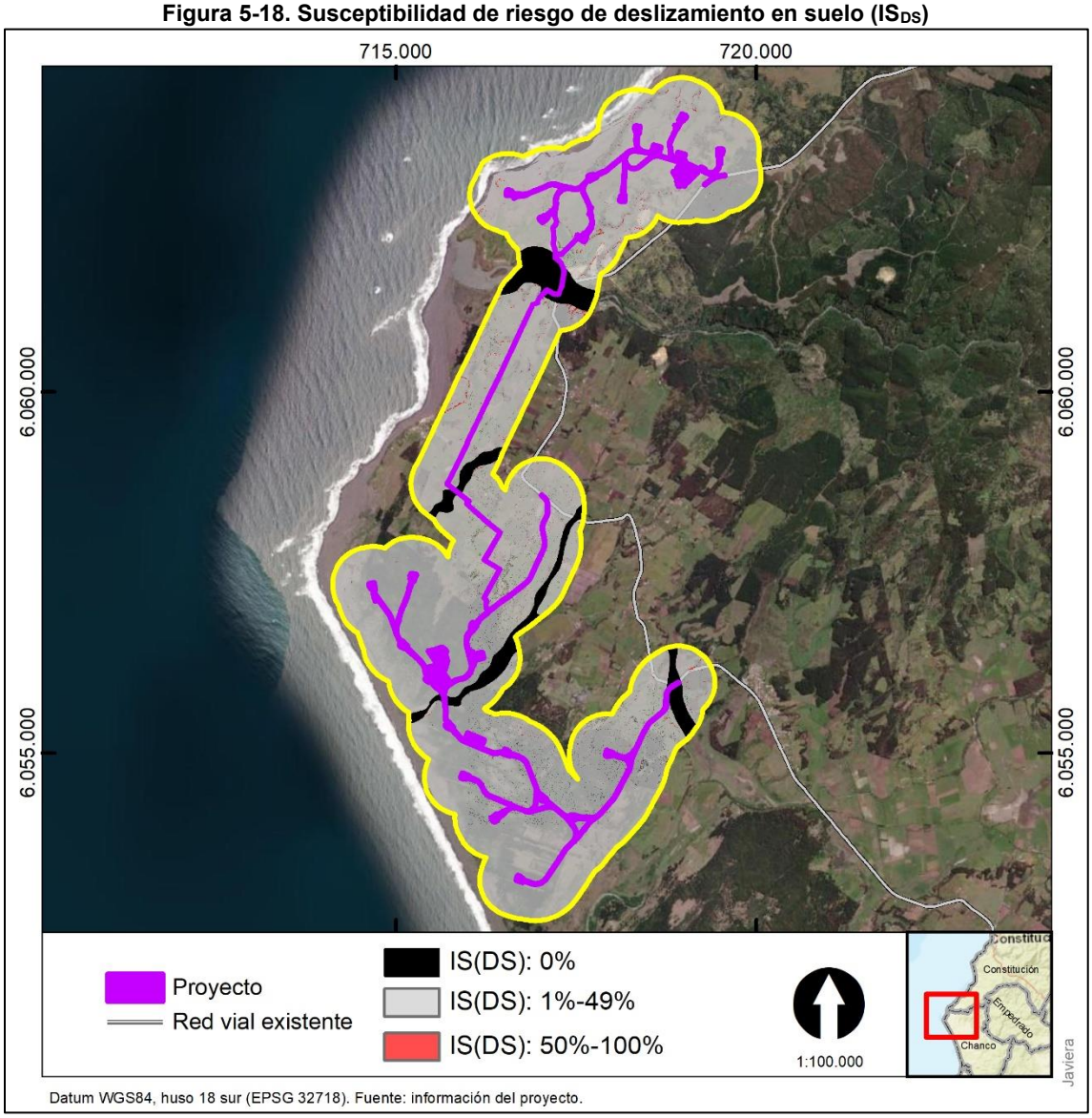
Tabla 5-7. Factores condicionantes para deslizamiento de suelo

Factor	Puntaje	Justificación
f1	0 – 26	Las pendientes en el terreno son suaves, pero se presentan sectores de hasta 38°.
f2	2 – 5	La exposición al sol es parcial en la mayor parte del área de influencia, por tratarse de laderas de exposición este u oeste.
f3	10	Se considera medianamente favorable, dada la naturaleza geológica sedimentaria.
f4	10	El nivel freático se encuentra a baja profundidad, por lo que la relación de profundidad se estima como Muy Favorable en términos de condiciones de humedad y saturación del suelo.
f5	0	La presencia de nieve en el área del proyecto es nula.
f6	0	La cobertura vegetal es alta.
f7	0	No se observan cortes artificiales u otras señales de desestabilización en los sectores con algún desarrollo de suelo.
f8	0	No se observan deslizamientos en el área en análisis.
f9	0	No se observan registros de deslizamientos en el área del proyecto.
f10	1	Las zonas en análisis presentan desarrollo de suelo.
IS_{DS}	**22 – 51**	**Índice de susceptibilidad mínima: 22% < 50%** **Índice de susceptibilidad máxima: 51% > 50%**

Fuente: Foco Ambiental, 2025.

El índice de susceptibilidad es menor a 50% en la mayor parte del área de influencia. Cabe señalar que, si bien se presentan valores de hasta 51%, estos se tratan de pixeles distribuidos en el área, por lo que se considera que su causa se asocia a la resolución del ráster y no a la susceptibilidad misma del área del proyecto. Por lo tanto, el área del proyecto se considera “no susceptible” al riesgo de deslizamiento de suelo.

Figura 5-18. Susceptibilidad de riesgo de deslizamiento en suelo (IS_{DS})



Fuente: Foco Ambiental, 2025.

b) Evaluación de la susceptibilidad a deslizamiento en roca

El área del proyecto no presenta zonas con desarrollo de suelo menor a 1 m de profundidad, por lo que no existe susceptibilidad a deslizamiento en roca.

c) Evaluación de la susceptibilidad a caídas de roca

El área del proyecto no presenta zonas con desarrollo de suelo menor a 1 m de profundidad, por lo que no existe susceptibilidad a caídas de roca.

d) Evaluación de la susceptibilidad a flujos de detritos

De acuerdo con lo levantado en la línea de base de hidrología, el proyecto no interactúa con cauces naturales o artificiales. Sin perjuicio de lo anterior, se ha evaluado la susceptibilidad a flujos de detritos en los cauces presentes en el área de influencia del Proyecto.

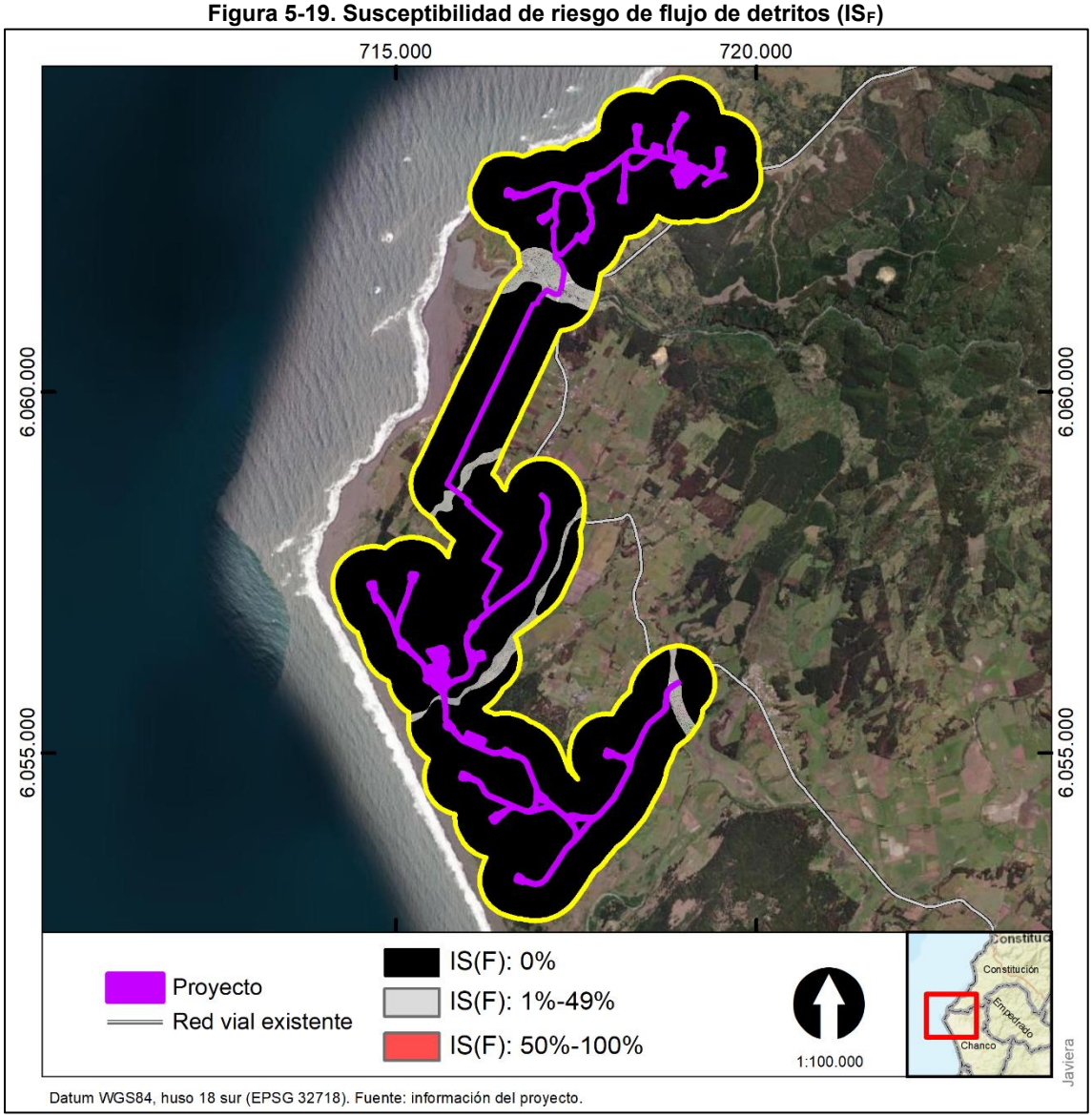
Tabla 5-8. Factores condicionantes para flujo de detritos

Factor	Puntaje	Justificación
f1	0	Las pendientes en la zona de Estero son suaves, menores a 10°.
f2	1	Dado que se trata de drenajes naturales, se asigna el valor asociado a la pendiente de ladera.
f3	4	El encajamiento de los ríos es medio.
f4	2	La exposición al sol es parcial en la mayor parte del área de influencia, por tratarse de laderas de exposición este u oeste.
f5	13	Se considera medianamente favorable, dada la naturaleza geológica sedimentaria.
f6	10	El nivel freático se encuentra a baja profundidad, por lo que la relación de profundidad se estima como Muy Favorable en términos de condiciones de humedad y saturación del suelo.
f7	0	Prácticamente no existe acumulación de nueve en la zona.
f8	0	La cobertura vegetacional en los sectores de cursos de agua es alta.
f9	0	No se observa desestabilización artificial dentro de las quebradas analizadas.
IS_{SC}	**29 – 30**	**Índice de susceptibilidad mínima: 29% < 50%** **Índice de susceptibilidad máxima: 30% < 50%**

Fuente: Foco Ambiental, 2025.

El índice de susceptibilidad es de 29% a 30%, por lo tanto, el riesgo de flujo de detritos se considera “no susceptible”.

Figura 5-19. Susceptibilidad de riesgo de flujo de detritos (IS_F)



Fuente: Foco Ambiental, 2025.

6 CONCLUSIONES

El proyecto se emplaza en una zona geológica conformada principalmente por secuencias sedimentarias, cuya geomorfología se caracteriza por tener pendientes suaves, interrumpidas por cursos de agua. Esta información, en conjunto con las líneas de base de hidrología, hidrogeología y vegetación, ha permitido analizar el riesgo de remoción en masa.

Se han evaluado cuatro tipos de remociones en masa, de acuerdo con la metodología planteada por Muñoz (2013) y los ajustes propuestos por Ceballos (2016), considerando los componentes geología, geomorfología, hidrología e hidrogeología, vegetación y clima como factores condicionantes. Dentro de este marco, se considera que un sector es susceptible a remociones en masa cuando su probabilidad es igual o superior a un 50%.

Con respecto a los factores gatillantes, el proyecto se emplaza en una zona que no tuvo lagunas sísmicas en 2024, donde el sismo de mayor magnitud de 2024 ha sido de magnitud 5,2, con epicentro en el Océano Pacífico, a 79 km de la costa chilena, entre Constitución y Chanco. Además, en el Océano Pacífico, cercano a las costas de Constitución, se ha registrado el epicentro de uno de los terremotos más fuertes del mundo, ocurrido el 27 de febrero de 2010, de 8,8 Mw magnitud Ritcher. En cuanto a precipitaciones y los efectos del cambio climático, se proyecta una disminución en las precipitaciones medias de la zona de crecida de un 9,5% para el periodo 2035-2065, por lo que se espera la disminución de los caudales de crecida; además, ARClim proyecta el aumento constante y considerable en la frecuencia de sequías, acompañadas de eventos de lluvias torrenciales puntuales de magnitudes por sobre los 150 mm y fuertes vientos de más de 10 m/s.

Los factores condicionantes en el área del proyecto presentan, por sí mismos, valores de riesgo de nivel bajo o nulo con respecto a los cuatro tipos de remociones en masa:

- Deslizamiento en suelo:
  - Índice de susceptibilidad mínima: 29% < 50%
  - Índice de susceptibilidad máxima: 51% > 50% (adjudicado a la resolución de ráster)
- Deslizamiento en roca:
  - No se encuentran zonas con cobertura de suelo menor a 1 m, por lo que la susceptibilidad es nula.
- Caída de rocas:
  - No se encuentran zonas con cobertura de suelo menor a 1 m, por lo que la susceptibilidad es nula.
- Flujo de detritos:
  - Índice de susceptibilidad: 29% a 30% < 50%

De este modo, se ha determinado que no existe susceptibilidad de remociones en masa por deslizamiento en roca o caída de rocas, y que presenta valores menores a 50% para deslizamiento de suelo y flujo de detritos, por lo que no son susceptibles.

7 BIBLIOGRAFÍA

- Atlas de Riesgos Climáticos para Chile (ARClim). Explorador de Amenazas Climáticas. Última consulta: 05 de diciembre de 2025. Sitio web: https://arclim.mma.gob.cl/amenazas/
- Ceballos, P., 2016. Evaluación de peligro de remociones en masa en Quebrada de Apoquindo, sector oriente de Santiago, Región Metropolitana.
- Centro Sismológico Nacional (CSN). Sismicidad 2024. Última consulta: 07-diciembre-2025. Sitio web: https://www.csn.uchile.cl/sismicidad-total-de-2024-aumento-un-4-8/
- Centro Sismológico Nacional (CSN). Sismología/Glosario. Última consulta: 12-diciembre-2025. Sitio web: https://www.csn.uchile.cl/sismologia/glosario/
- Centro Sismológico Nacional (CSN). Sismicidad y terremotos en Chile. Última consulta: 12-diciembre-2025. Sitio web: https://www.csn.uchile.cl/wp-content/uploads/2014/06/001_terremotos_y_sismicidad_chile.pdf
- Hauser, SERNAGEOMIN 1993. Remociones en masa en Chile.
- Instituto Nacional de Normalización (1996). Norma Chilena de Diseño Sísmico de edificios, NCh 433
- Lara, M., 2007. Metodología para la evaluación y zonificación de peligro de remociones en masa con aplicación en quebrada San Ramón, Santiago Oriente, Región Metropolitana. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias, mención Geología. Universidad de Chile, 2007. Mora, R., Vahrson, W. y Mora, S. (1992) Mapa de Amenazas de Deslizamientos, Valle Central, Costa Rica. Centro de Coordinación para la Prevención de Desastres Naturales en América Central (CEPREDENAC).
- Mora, S. & Vahrson, w. (1993). Determinación “a priori” de la amenaza de deslizamientos utilizando indicadores morfodinámicos.
- Muñoz, E. 2013. Susceptibilidad de remociones en masa y de respuesta sísmica asociada a fallas mayores en zonas urbanas. Estudio de caso en Viña del Mar, V región.
- Popescu, M.E., 2002. Landslide Causal Factors and Landslide Remedial Options. Keynote Lecture, Proceedings 3rd International Conference on Landslides, Slope Stability and Safety of Infra-Structures, Singapore, p. 61-81.
- SENAPRED. Desastres en la Memoria. Última consulta: 12 de diciembre de 2025. Sitio web: https://desastresenlamemoria.cl/
- SERNAGEOMIN (2000) Carta Geológica de Chile Escala 1:1.000.000.
- SERNAGEOMIN. Catálogo Nacional de Información Geológica y Minera – Portal GEOMIN. Última consulta: 05 de diciembre de 2025. Sitio web: https://portalgeomin.sernageomin.cl/
- Varnes, D., 1978. Slope movement types and processes. En: R.L. Schuster and R.J. Krizek (Editors), Landslides: Analysis and Control. Transportation. Research Board, National Academy of Sciences, Washington D.C., Special Report 176: 11-33.

APÉNDICE 3.4.1

ÁREAS DE ESTUDIO Y DE INFLUENCIA GEORREFERENCIADA

Se adjunta cartografía digital en formato SHP (EPSG 32718) y KMZ.

FOCO AMBIENTAL
Consultoría Medioambiental