



LÍNEA BASE DE GEOLOGÍA, GEOMORFOLOGÍA, HIDROGEOLOGÍA Y RIESGO GEOLÓGICO DEL SECTOR ARENAL, COMUNA DE COPIAPÓ, REGIÓN DE ATACAMA, CHILE.

Alejandra Patricia Casiccia Andarriena

Profesor Guía: MsC. Abraham Elías González Martínez
Profesores Comisión: Sr. Ramiro Ulises Bonilla Parra
Dr. Luis Arturo Quinzio Sinn

Resumen.

El trabajo presenta la línea base de la geología, geomorfología, hidrogeología y riesgos geológicos del área de construcción de un recinto público en el sector "El Arenal", ubicado al NE de la comuna de Copiapó, Región de Atacama.

El área del proyecto está en el flanco occidental de la Cordillera de la Costa, en una pampa rellena de depósitos aluviales, bordeada por serranías conformadas por rocas del Complejo Epimetamórfico Chañaral, Plutón Sierra el Roble, Plutón Cerro Moradito y al Plutón Cerro Morado.

La unidad hidrogeológica del área corresponde a Depósitos no Consolidados, ubicados en el sector acuífero N° 6, denominado Piedra Colgada-Angostura (a 9 m de profundidad, aprox.). Debido a que las fundaciones del proyecto no sobrepasarán los 3 m de profundidad, las obras no interceptarán las aguas subterráneas.

Los riesgos geológicos que pueden afectar la zona de estudio corresponden al sísmico y al de remoción en masa. Los sismos tienen una tasa de recurrencia, para eventos relevantes, cercana a 100 años, con línea de tendencia NNW-SSE. El riesgo de remoción en masa, dadas las características geológicas y geomorfológicas del área, se estima bajo.

Palabras Claves: *Línea base, proyecto El Arenal, geología, geomorfología, hidrogeología y riesgo*

geológico.

1 Introducción

1.1 Generalidades

La línea de base consiste en la descripción detallada del área de influencia de un proyecto o actividad, antes de su ejecución. Constituye uno de los contenidos mínimos exigidos por la Ley N° 19.300, sobre Bases Generales del Medio Ambiente, para la elaboración de Estudios de Impacto Ambiental, lo cual permite evaluar los impactos que se pueden producir sobre los elementos del medio ambiente (web SEA).

En este trabajo se entregan los resultados del contexto geológico, geomorfológico, hidrogeológico y posibles riesgos geológicos, asociados al sector "El Arenal", ubicado en el extremo NW de la comuna de Copiapó, Región de Atacama (Figura 1 A).

Las coordenadas UTM (datum WGS84) aproximadas corresponden a 6.974.631,88 m S y 332.994,06 m E. El área se extiende en la Cordillera de la Costa, a 35 Km al W de la ciudad de Copiapó, en el extremo NE de la comuna; cerca del límite con el municipio de Caldera, inmediatamente al NE de la Ruta 5 y a unos 2 km al N del Río Copiapó.

1.2 Objetivo General

El objetivo general es caracterizar el contexto geológico, geomorfológico, hidrogeológico y eventuales riesgos geológicos del sitio del proyecto,

en base a la revisión de antecedentes bibliográficos y de una visita a terreno; para así poder identificar o descartar problemas futuros en la construcción del dicho proyecto.

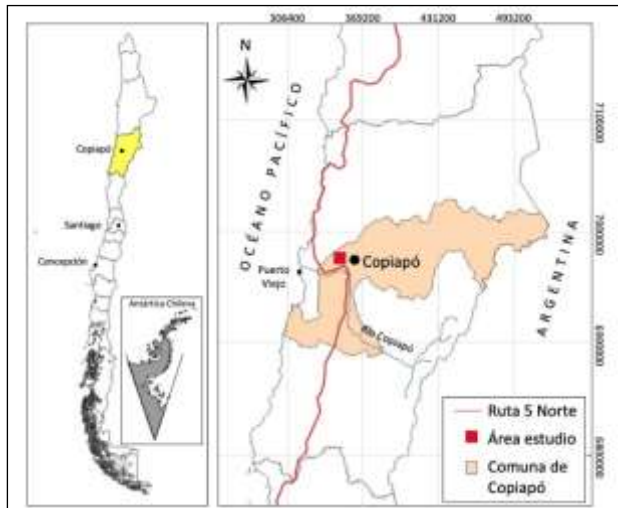


Figura 1: Mapa de ubicación área del Proyecto. Elaboración propia a partir de planos del IGM.

1.3 Objetivos Específicos

- Identificar y describir las unidades geológicas del área.
- Identificar y caracterizar la geomorfología de las macroformas presentes en el contexto geomorfológico regional y local del proyecto.
- Identificar y describir el comportamiento de las unidades hidrogeológicas del área, definidas por la DGA.
- Identificar y describir posibles áreas expuestas a riesgos geológicos en el área de las obras del proyecto.

1.4 Agradecimientos

Quiero agradecer a la empresa B&Z Geoconsulting, en especial a Marcia Escobar por darme la oportunidad de ser parte de este trabajo y la autorización para utilizar los datos.

2 Marco Geológico, Geomorfológico e Hidrogeológico

2.1 Marco Geomorfológico Regional

La Región de Atacama se caracteriza, a esta latitud, por el desarrollo de W a E, de un sector costero rocoso y parcialmente cubierto por terrazas de abrasión marina escalonadas, llamada Planicie Marina y/o Fluviomarina, que hacia el E da lugar a cordones de cerros de baja altura, que constituyen

la Cordillera de la Costa, cuyos faldeos orientales se encuentran cubiertos por amplias pampas, denominadas Pampas Australes u onduladas, las cuales, hacia el S del área de estudio, son conocidas como Pampas Transicionales. Estas pampas están delimitadas hacia el E por una serie de valles transversales de orientaciones NE-SW, que paulatinamente dan forma a la Precordillera y a la Cordillera de los Andes (Börgel, 1983) (Figura 2). Las unidades antes señaladas, son atravesadas por el valle del río Copiapó desde su nacimiento, en la Cordillera de los Andes, hasta su desembocadura, en la localidad de Puerto Viejo.

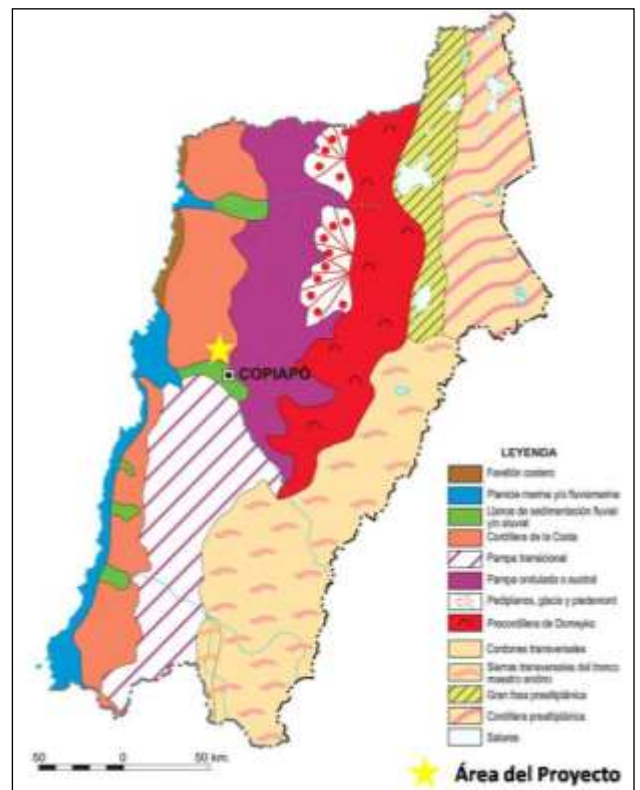


Figura 2: Esquema de Unidades Geomorfológicas de la Región de Atacama. Börgel, 1983.

2.2 Marco Geológico Regional

Le geología del sector occidental del río Copiapó consiste de W a E, en un basamento de rocas metamórficas paleozoicas, con afloramientos cercanos a la costa. Al NW del área de estudio, estas rocas se encuentran intruidas por plutones jurásicos y parcialmente cubiertas por sedimentitas terciarias y depósitos no consolidados cuaternarios de origen marino y eólico, propios de un ambiente geotectónico de plataforma costera emergente. Hacia el E, se extiende una amplia llanura

constituida por gravas no consolidadas a semiconsolidadas, de edades comprendidas entre el Mioceno y el Plioceno; localmente cubiertas por depósitos eólicos y aluviales modernos. El extremo oriental, está formado por cordones de cerros precordilleranos, con rocas sedimentarias e intrusivas de edades comprendidas entre el Cretácico y el Paleógeno (Figura 3, fuera de texto).

Las unidades geológicas, de más antigua a más reciente, se describen a continuación:

2.2.1 *Complejo Epimetamórfico Chañaral (Dcce).*

Godoy y Lara (1998 en Godoy *et al.*, 2003) describen a una secuencia de metareniscas y pizarras asignadas al Devónico-Carbonífero, que aflora a unos 25 km al E de la línea costera entre Caldera y el sector de Cerro Los Verdes, caracterizada por su color negro intenso, en las que se reconoce una fina foliación penetrativa paralela a la estratificación, con rumbo promedio NS y manteo subvertical. La base de este complejo no aflora y se encuentra intruido por diferentes plutones jurásicos y parcialmente cubiertas, en discordancia, por depósitos sedimentarios como Estratos de Caldera y Depósitos Eólicos Cuaternarios.

2.2.2 *Plutón Sierra El Roble (Jsr).*

Godoy *et al.* (2003) definen este intrusivo constituido por dioritas, dioritas cuarcíferas, gabros y en menor proporción, monzogranitos, todos de grano medio a grueso y de tonos oscuros a rojizos. Conforman una franja de unos 8 km de ancho y elongación NNE-SSW, a lo largo de la parte central de la Carta Caldera y se extiende unos 20 km hacia el N en la Hoja Puerto Falmenco. Es asignado al Jurásico porque intruye al Complejo Epimetamórfico Chañaral (Dcce) y subyace, en inconformidad, en el sector de Cerro Los Verdes, a los Estratos de Agua Amarga (Plaa).

2.2.3 *Plutón Cerro Moradito (Jkm).*

Esta unidad es descrita como un cuerpo intrusivo de dioritas cuarcíferas y granodioritas de grano medio y color gris por Godoy y Lara (1998 en Godoy *et al.*, 2003). Aflora, parcialmente cubierto por dunas, al norte del río Copiapó (sector oriental de la Carta Caldera), con orientación NNE-SSW, 8 km de ancho y se acuña en el extremo S de la carta. En

la Hoja Quebrada Salitrosa su extensión es mayor, superando los 50 km. Como intruye al Plutón Sierra El Roble (Jsr) y es cortado por el Plutón Cerro Morado (Kgm) se asigna al Jurásico-Cretácico.

2.2.4 *Plutón Cerro Morado (Kgm).*

Fue definido por Godoy y Lara (1998 en Godoy *et al.*, 2003). Corresponde a un conjunto de tonalitas, granodioritas, dioritas cuarcíferas asignadas al Cretácico, que se extiende en el sector oriental de la Carta Caldera, desde Punta Médano (al S) hasta Sierra Ramadillas (al N), parcialmente cubierto por dunas, y, en menor proporción, a apófisis de granito de grano medio, color gris claro. Más al N aparece en las hojas Copiapó y Salitrosa. Intruye al Plutón Cerro Moradito, y al E (fuera del área de estudio) está en contacto por falla con rocas metamórficas y con otros intrusivos.

2.2.5 *Gravas del Copiapó (MPlgc).*

Se definen como Gravas del Copiapó (Godoy *et al.*, 2003) a los depósitos sedimentarios no consolidados a semiconsolidados de gravas polimícticas, clastosoportadas, de baja esfericidad y tonalidades grises a pardo grisáceas, que afloran a ambos lados del río Copiapó, en el sector S del área de estudio. En menor proporción se incluyen bolsones de bolones, arenas y limos. Las arenas, más abundantes hacia el W, de madurez textural moderada, están ocasionalmente cementadas por calcita y yeso, minerales asociados a procesos de circulación de aguas subterráneas o superficiales, esporádicas en zonas desérticas. En la descripción de Godoy *et al.* (2003), mencionan que su base es desconocida y tiene un espesor mínimo de 50 m (probablemente depositada directamente sobre basamento y granitoides mesozoicos), engrana lateralmente con las rocas sedimentarias marinas de la Formación Bahía Inglesa, al W de la zona de estudio. Subyace a Estratos de Agua Amarga (Plaa) y a Depósitos Aluviales (Qal) en el sector del Llano de las Liebres. Los autores la asignan al Mioceno-Plioceno.

2.2.6 *Formación Bahía Inglesa (MPIbi)*

Marquardt *et al.* (2000 en Godoy *et al.*, 2003), la definen como una secuencia sedimentaria clástica, fosilífera y semiconsolidada, de carácter marino litoral y variaciones laterales y verticales de facies, expuesta a lo largo de la franja costera de la Carta

geológica Caldera. Godoy et al. (2003), le asignan una edad Mioceno Medio-Plioceno Inferior, en base a su contenido fosilífero (*Globigerina bulloides*, *Neogloboquadrina pachyderma*, *Globigerinellacalida* y *G. crassaformis*) y relaciones morfoestratigráficas.

2.2.7 Estratos de Agua Amarga (Plaa)

Blanco et al. (2003) definen estos estratos como una sucesión de coquinas, gravas y arenas, de tonalidades pardo-amarillentas a gris claras y carácter marino-litoral, dispuestas en capas de espesores decimétricos a métricos. Al sur del Llano de las Liebres forman planicies cubiertas por fragmentos carbonáticos, disgregados por acción del retrabajo aluvial y eólico. Esta unidad sobreyace a las Gravas del Copiapó (MPlgc) y están localmente cubiertas por los Estratos de Caldera (Qec) y por los Depósitos Eólicos. Blanco et al. le asigna una edad Plioceno, a partir de su contenido fosilífero en estratos bien preservados (tanatocenosis de *Anomia Atacamensis*, *Clamys coquimbensis*, *Ostrea cf. Máxima*, *O.ferrasi*, *Concholepas cf. nodosa*, *Lingula*, *Lima*, *Fusinus remondi*, y *Chorus cf. grandis*) y su relación morfoestratigráfica con los Estratos de Caldera y las Gravas de Copiapó.

2.2.8 Estratos de Caldera (Qec).

Marquardt et al. (2000), en Godoy et al. 2003, definen estos estratos como un conjunto de sedimentos carbonáticos y clásticos, de conglomerados, arenas y coquinas, asociados a terrazas de abrasión marinas. Sobreyace en paraconformidad, a la Formación Bahía Inglesa y a Estratos de Agua Amarga (Plaa). Localmente, se encuentra cubierta por depósitos continentales, tanto eólicos como aluviales, de espesores inferiores a 1,5 m. Hacia el oeste tiene un amplio desarrollo a lo largo de la actual costa. La presencia de fósiles de *Argopecten Purpuratus* y *Conchalepas Conchalepas*, es considerada indicadora de edad Cuaternario.

2.2.9 Depósitos Aluviales (Qal).

Godoy et al. (2003) los definen como depósitos no consolidados a moderadamente consolidados, de gravas y bloques y, en menor proporción, arenas y limos que constituyen abanicos aluviales. Sus clastos, incluidos en una matriz de arenas y limos,

son frecuentemente monomícticos, angulosos y mal seleccionados. Por sus relaciones morfológicas y de contacto Godoy et al. (2003) dividen estos depósitos en: **Inactivos Qal(1)**, estos se presentan como abanicos y se encuentran solevantados y modificados por los cauces aluviales, afloran al NE del área del proyecto y al SE del río Copiapó; **Activos Qal(2)**, tienen morfología de abanico y rellenan quebradas o cauces de actividad esporádicas. Se sobreponen a Depósitos Litorales del Plioceno (Estratos de Agua Amarga, Plaa) y son cubiertos o engranan con Depósitos Eólicos Activos (Qe2).

2.2.10 Depósitos Fluviales (Qf).

Veit (1996, en Godoy et al., 2003) describen esta unidad como depósitos no cohesivos a moderadamente consolidados de bloques, gravas, arenas, limos y evaporitas subordinadas; se distribuyen a lo largo del río Copiapó, donde constituyen terrazas fluviales de espesores métricos, tanto en el lecho actual como colgadas. Estos depósitos han sido labradas en unidades marinas y continentales del Neógeno y parte del Cuaternario (Qec), por lo que se les considera de edad Pleistoceno a Holoceno. Se diferencia 2 grupos de facies: **Gravas Qf(a)**: bancos clastosoportados de bloques y gravas, los cuales afloran a lo largo del lecho del río Copiapó, al este del área de estudio, donde forman bancos de hasta 4 m de espesor, este nivel se forma a partir del retrabajo de las Gravas del Copiapó; **Limos y arcillas Qf(b)**: bancos centimétricos de sedimentos de grano fino que cubren las llanuras de inundación de las terrazas fluviales, este nivel es el que prevalece al sur del área de estudio, en la ribera del río Copiapó.

2.2.11 Depósitos Eólicos (Qe).

Godoy et al. (2003), definen esta unidad como depósitos de arenas cuarzo-feldespáticas, expuestas a lo largo de la franja costera y, tierra adentro, principalmente al norte del río Copiapó. Cubren sedimentos cuaternarios (Qec, Qal) y secuencias miocenas-pliocenas (MPlbi, Plaa) y en parte son producto de su retrabajo. Se dividen en: **Inactivos (Qe1)**, depósitos mantiformes de arenas de reducida movilidad, con diferentes grados de cementación; y **Activos (Qe2)**, que corresponden a

arenas no cohesivas y móviles. Godoy et al. (2003), le asignan una edad Cuaternaria.

2.2.12 Geología Estructural

Godoy et al. (2003), detallan que al norte del río Copiapó, existen fallas rellenas de material andesítico de probable edad Cretácico Inferior los cuales se emplazaron en fallas de rumbo que desplazan dextralmente el contacto entre plutones y el basamento epimetamórfico (Figura 3, fuera de texto). Estudios anteriores indican una edad de exhumación de estos plutones a fines del Cretácico temprano y comienzos del Cretácico tardío (Grist, 2000, en Godoy et al., 2003).

Durante el cuaternario se documentan un conjunto de fallas normales de desplazamientos centimétricos a métricos y tensor extensional NW-SE, que cortan los Estratos de Caldera (Qec) (Godoy et al., 2003). Este fallamiento podría estar relacionado con la acomodación de la cobertura sedimentaria a la reactivación de fallas preexistentes, probablemente durante un sismo de subducción (Marquardt y Lavenau, 1999 en Godoy et al., 2003).

Tanto los depósitos aluviales antiguos, como los depósitos aluviales Inactivos (Qal (1)), los cuales la mayor parte se encuentran sollevantados, atestiguan un alzamiento Cuaternario (Godoy et al., 2003).

2.3 Hidrogeología

2.3.1 Marco Hidrológico

El área del Proyecto se ubica en el sector W de la cuenca hidrográfica “Río Copiapó” (Inventario Público de Cuenas Hidrográficas, página web DGA), la cual cubre un área de 18.704 km², desde la Cordillera de los Andes hasta su desembocadura, y se extiende en su totalidad dentro de la III Región de Atacama.

La cuenca del Río Copiapó es de tipo exorreico, nace en la Cordillera de los Andes, pasa por la Cordillera de la Costa y desemboca al mar, en el sector de Puerto Viejo. Está subdividida en 6 subcuencas que de aguas arriba a aguas abajo son: Río Jorquera, Río Pulido, Río Manflas, Río Copiapó Medio, Río Paipote y Río Copiapó Bajo.

El río Copiapó, se forma al unirse los ríos Pulido y Jorquera, en el sector de La Junta a 1.230 m s.n.m., recibiendo aportes provenientes del río Manflas, el que accede desde del sur con un reducido caudal. Una vez formado el río Copiapó en La Junta, su cauce toma un rumbo hacia el NNW hasta la confluencia de la quebrada de Paipote, con una longitud de 90 km. A partir de este punto, describe un arco suave hacia el NW para tomar, a la altura de la ciudad de Copiapó, un rumbo al W y sentido de escurrimiento en dirección al mar.

El río Copiapó posee un régimen mixto, alimentado por aportes pluviales y nivales, posee escaso caudal, pero es de alta importancia para las actividades de minería y agricultura en la región. El río transcurre encajonado, aunque en algunos sectores forma terrazas, las cuales son aprovechadas para una importante agricultura.

En general, la cuenca del Río Copiapó presenta escasas lluvias, con una precipitación anual de 28 mm y un alto nivel de evaporación.

El Proyecto está inserto en la subcuenca del “Río Copiapó Bajo”, ubicada aproximadamente desde la ciudad de Copiapó hasta la desembocadura del río Copiapó, en específico se encuentra en la sub-subcuenca “Río Copiapó Entre Quebrada La brea y Quebrada Totalillo”, cercano al límite con la sub-subcuenca “Río Copiapó Entre Quebrada Totalillo y Desembocadura” (Figura 4).



Figura 4: Cuenas, subcuencas y sub-subcuencas hidrográficas del área del Proyecto. Elaboración propia a partir de Google Earth, Imagen Landsat© 2017 Google. Inventario Público de Cuenas Hidrográficas, página web DGA.

2.3.2 Marco Hidrogeológico

El área del proyecto (Figura 5), se encuentra en la unidad hidrogeológica Depósitos no Consolidados, de permeabilidad alta a media según el Mapa Hidrogeológico de Chile (DGA, 1989), la cual estaría representada por gravas, arenas y limos de la unidad geológica Depósitos Aluviales (Qal).

Hacia los límites este y oeste, la unidad se encuentra limitada por la unidad impermeable y de nula importancia hidrogeológica, Rocas Plutónicas del Jurásico al Cretácico.

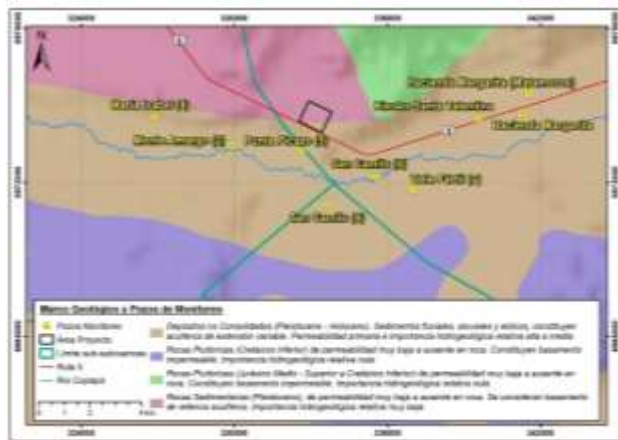


Figura 5: Mapa Hidrogeológico del área del Proyecto.
Estaciones de monitoreo de niveles de agua subterránea DGA. Elaboración propia a partir de Google Earth, Imagen Landsat© 2017 Google. Mapa Hidrogeológico DGA, 1989. Estaciones de monitoreo agua subterránea DGA.

3 Metodología

El análisis de la Geología se realiza en función del Marco Geológico Regional y el Marco Geológico Local. Para la recopilación de información y antecedentes bibliográficos se recurrió a la información disponible en el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), específicamente lo relacionado con el Mapa Geológico Nacional y en base a la Carta Caldera, Serie Carta Geológica de Chile N° 76, a escala 1:100.000 año 2003, del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), elaborado por Godoy *et al.* El análisis del Marco Geológico Local se realizó a partir de una visita a terreno, en la cual se hizo un levantamiento geológico de superficie, en el que se identificaron y describieron las unidades geológicas detectadas en el área de influencia directa del proyecto.

El análisis de la Geomorfología se realizó en función del Marco Geomorfológico Regional y el Marco Geomorfológico Local. Como principal fuente de información se tomó la publicación de Geomorfología del Instituto Geográfico Nacional, basado en el trabajo de Börgel (1983). Además, se examinaron estudios geomorfológicos realizados en forma académica para el área de estudio y la información de geología incluida en los instrumentos de planificación territorial o de ordenamiento territorial. La primera parte del trabajo realizado en gabinete tiene por objetivo caracterizar la geomorfología de las macroformas presentes en el contexto geomorfológico regional del proyecto. La segunda parte del análisis comprende la caracterización de la geomorfología local en base a los siguientes indicadores geomorfológicos:

- El análisis de la altitud se realiza a partir de las curvas de nivel a escala 1:50.000.- provenientes de la carta topográfica del IGM, C-091 Sierra Monardes.

- El análisis de la pendiente consiste en el procesamiento del modelo digital de terreno generado para el indicador de altitud, en el Software Arcgis 1.0, a través del módulo Slope, el que genera un modelo Raster de las pendientes del área de instalación del Proyecto y sus alrededores, estas pendientes se clasificaron según la clasificación de Börgel *et al.* (1972).

Para la elaboración de la Línea Base de Hidrogeología, se realizaron y analizaron antecedentes bibliográficos disponibles para el área de estudio, además de información técnica especializada y observaciones levantadas durante la visita a terreno. Los antecedentes públicos revisados corresponden principalmente a informes y datos disponibles en la Dirección General de Aguas (DGA) y Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), así como también mapas e informes elaborados por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).

El análisis de riesgos geológicos se realizó a través de fuentes bibliográficas y modelamientos en sistemas de información geográfica (SIG). Para la

recopilación de información y antecedentes bibliográficos se recurrió a la información que se encuentra disponible en los siguientes organismos: Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), Centro Sismológico Nacional y U.S. Geological Survey (USGS).

El análisis de sismicidad se realizó a través de una búsqueda de los eventos sísmicos con magnitudes iguales o superiores a 7° Richter, registrados en la tercera región de Atacama, por las autoridades competentes y/o organismos internacionales (Servicio Sismológico Nacional y USGS), realizando comparaciones en cuento a las magnitudes, epicentros y/o hipocentros.

Para determinar la existencia de riesgos de remoción en masa, como primer paso, se realizó una búsqueda bibliográfica de informes para el área de estudio (B&Z, 2016). Posteriormente, se realizó una visita a terreno en la que se identificaron las condiciones geológicas y geomorfológicas, que eventualmente podrían desencadenar eventos naturales episódicos que transformen las condiciones físicas del entorno de manera temporal o permanente.

4 Resultados

4.1 Geomorfología Local

El proyecto se extiende en la Cordillera de la Costa, la cual, a esta latitud consiste en una franja irregular de cerros de baja altura (200 a 500 msnm) y suaves pendientes, modelados sobre intrusivos mesozoicos y rocas metamórficas que datan del Paleozoico (Fotografía 1, fuera de texto). El área de construcción del proyecto corresponde a un flanco occidental de la Cordillera de la Costa, el cual se encuentra localizado en una pampa de entre 2 y 2,5 km de ancho (dirección NE-SW) y 2 km de largo (dirección NW-SE), con elevaciones que fluctúan entre los 185 y 191 msnm y pendientes de 2°-5°, las que localmente aumenta levemente hacia el SE (Figura 6); esta pampa se encuentra rellena principalmente, por depósitos aluviales. El área del proyecto está delimitada hacia el norte y este por valles transversales de direcciones preferenciales NE-SW, caracterizados por el desarrollo de serranías y llanos; al sur, a unos 2 km de distancia, está delimitada por el valle del Río Copiapó.

4.2 Geología Local

El área del proyecto se extiende a pocos metros al NE de la Ruta 5 Norte, a través de la Cordillera de la Costa, a 2 km hacia el norte del río Copiapó. Esta área conforma un amplio llano bordeado por una serranía, sin nombre, compuesto por afloramientos de rocas (Figura 7), conformado de noroeste a sureste por: Complejo Epimetamórfico Chañaral (DCce), Plutón Sierra El Roble (Jsr), Plutón Cerro Moradito (JKm) y el Plutón Cerro Morado (Kgm) (Fotografía 2, fuera del texto).

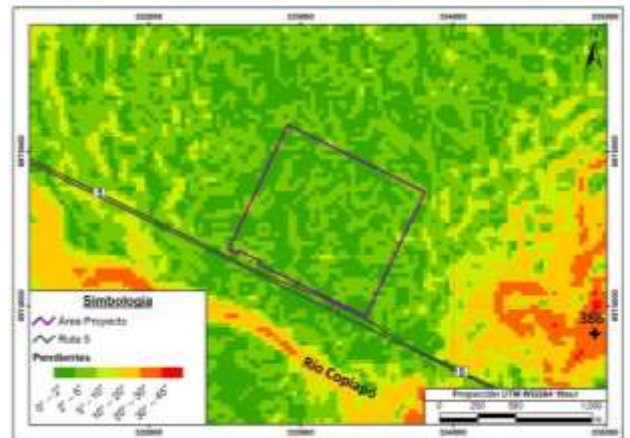


Figura 6: Pendientes del área del proyecto. Fuente: Elaboración a partir de modelo Raster de las pendientes del área.

En la zona se ha distinguido solo una unidad aflorando, correspondiente a los Depósitos Aluviales (Qal) (Fotografía 3, fuera de texto), los que sobreyacen en el lado SW del área, a los sedimentos de Gravas del Copiapó (MPlgc) (Figura 7), pero en la actualidad se encuentra cubiertos por depósitos aluviales y de origen antrópico.

La composición de esta unidad en el área, principalmente al noreste del proyecto, corresponden a sedimentos no consolidados, polimícticos, subredondeados, de baja esfericidad, moderada a mala selección, con matriz arenosa, y clastos que varían de 0,5 cm hasta 2 cm, predominando los clastos < 1 cm y con presencia esporádicas de clastos tamaño grava. Estos sedimentos pertenecerían a las zonas más distales de los depósitos aluviales, y su origen corresponde a sedimentos tractivos de escorrentías de aguas superficiales esporádicas (Fotografía 4, fuera de texto).

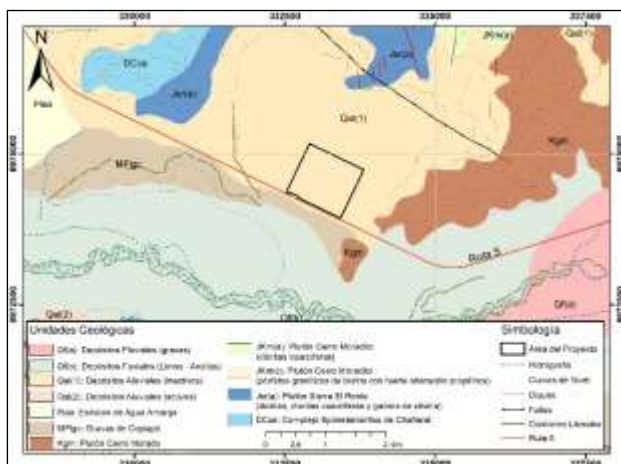


Figura 7: Mapa Geológico Local del Área del Proyecto. Fuente: Elaboración Propia en base a Cartografía SERNAGEOMIN y visita a terreno.

En la esquina Este del polígono del área del proyecto, se observa un considerable aumento de los clastos de mayor tamaño, mejorando la selección de los sedimentos; esto se debe principalmente a la cercanía de la fuente de los sedimentos que dan origen a los depósitos aluviales (Fotografía 5, fuera de texto).

En el lado SW del cuadrángulo, casi limitando con la Ruta 5, se observa un aumento del retrabajo de los sedimentos, probablemente producto de la intervención antropogénica en el sector (Fotografía 6, fuera de texto).

4.3 Hidrogeología área del Proyecto

Como se indicó anteriormente, el área del Proyecto se ubica entre el Río Copiapó y la Cordillera de la Costa. La unidad hidrogeológica principal corresponde a la unidad de Depósitos no Consolidados (gravas, arenas y limos) del valle del río, bordeada por a las Rocas Plutónicas de permeabilidad baja a nula.

De manera de inferir la potencial presencia de agua subterránea en el entorno de las obras del Proyecto, se revisó en detalle la información de niveles de agua subterránea dispuesta en la red de estaciones de monitoreo de la DGA. Asimismo, se revisaron los registros de niveles reportados en los informes de los documentos del año 2010 y 2013 de la DGA. Los informes de sectores acuíferos del valle del río Copiapó (DGA, 2010 y 2013), determinan que el área en que se planea la construcción del Proyecto, pertenece al sector

acuífero N° 6, denominado Piedra Colgada – Angostura. Por su parte, el registro de niveles de la DGA para este sector acuífero (Tabla N°1, fuera de texto) indica que el agua subterránea se ubica a profundidades que oscilan entre los 9,5 y 6,0 m desde la superficie (Figura 5). Específicamente, el pozo Punta Picazo (5), ubicado entre el río Copiapó y el área del proyecto, a una distancia aproximada de 0,5 km al NE del río Copiapó y 1,2 km al SW del área de construcción del Proyecto, presenta niveles de agua subterránea en torno a los 9,0 m de profundidad, en enero del 2017.

No obstante, lo anterior, dado que la unidad hidrogeológica de Depósitos no Consolidados en la zona de interés, se encuentra limitada hacia el NE, NW y SE, por la unidad impermeable de Rocas Plutónicas y Metamórficas (Basamento), es posible inferir que el acuífero, de persistir en esta zona, se acuñaría hacia el borde impermeable de roca. En tal caso, el nivel de agua subterránea poseería una profundidad similar a la reportada por los pozos de monitoreo DGA, ya que la recarga del acuífero ocurre aguas arriba en la cuenca de río Copiapó y el flujo de agua posee una dirección preferente en esta sección del acuífero, desde este a oeste.

Dado que las fundaciones de las obras planeadas para el Proyecto no sobrepasan los 3 m de profundidad, se estima que, de persistir el acuífero en este sector, las obras no lo interceptarían.

4.4 Riesgo Geológico

Los riesgos Geológicos y Geomorfológicos se consideran y definen como toda interacción del ambiente físico de un área determinada, que es desencadenada por eventos naturales episódicos que provocan una transformación de las condiciones físicas del entorno de manera temporal o permanente.

Con relación al área del Proyecto, ésta queda sometida a dos tipos de agentes los cuales podrían implicar riesgos. Estos son los agentes de carácter endógeno, los cuales implican riesgo sísmico, y los agentes exógenos, los cuales están dados por fenómenos de remociones en masa.

4.4.1 Riesgos Endógenos

Chile se encuentra ubicado sobre el borde occidental de la placa Sudamericana, donde converge y genera una zona de subducción con la placa de Nazca. Esta configuración geotectónica, se expresa a través de una activa sismicidad con potencialidad de ocurrencia de importantes terremotos y tsunamis (Figura 8).

4.4.1.1 Riesgo Sísmico

La III Región de Atacama, se extiende entre el paralelo 25°17' y el 29°30' de latitud Sur. Su registro sísmico data de 1796 y se ha caracterizado por una actividad sísmica de profundidad somera a intermedia (14-100 km). Los principales sismos destructivos a la latitud del proyecto se presentan en el Tabla N°2 (Fuera de texto).

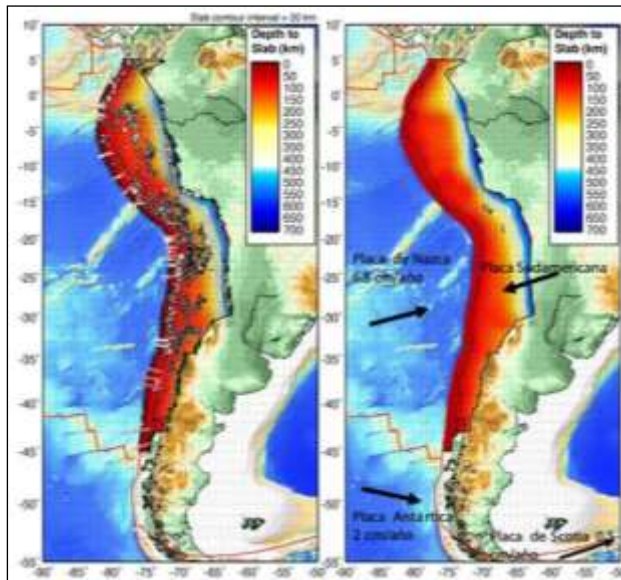


Figura 8: Marco Tectónico de Chile. Dirección y velocidad de convergencia. Los puntos blancos, son sismos que permiten determinar la profundidad y geometría de la zona de subducción. Fuente: Sismicidad y Terremotos en Chile. Centro Sismológico Nacional, Universidad de Chile.

Según la Tabla N°2 (Fuera de texto), los eventos sísmicos de mayor magnitud fueron los ocurridos el 11 de abril de 1819 en Copiapó (Ms 8,3); el 4 de diciembre de 1918 en Caldera (Ms 8,2); y el 10 de noviembre de 1922 en Caldera (Ms 8.39). Los que dan cuenta de una tasa de recurrencia en torno a los 100 años y una línea de tendencia NNW (Figura 9).



Figura 9: Sismos Importantes y/o Destructivos cercanos a la latitud del proyecto con Magnitudes Ms mayores o iguales a 7,0 (1796 a la fecha). Fuente: Servicio Sismológico de Chile.

4.4.2 Riesgos Exógenos

4.4.2.1 Remociones en Masa

Para realizar el análisis de Riesgo de Remociones en Masa, se consideran las características geológicas del sector, las pendientes y el tipo de erosión observada.

El llano en donde se aloja el área del proyecto se caracteriza por su pendiente prácticamente horizontal y relleno sedimentario. Por lo que se estima un bajo riesgo de fenómenos de Remoción en masa para este sector (Tabla N°3, fuera de texto).

A pesar de que el área se encuentra bordeada por una serranía de pendientes moderadas a fuertes, la distancia de ésta al área del proyecto es superior a 1 km, a excepción del borde SE del polígono que tiene una distancia menor, la cual fluctúa aproximadamente entre 250-600 m; lo cual excepcionalmente, esta zona del Proyecto podría estar expuesto a un riesgo bajo a medio de fenómenos de Remoción en masa (Figura 10).

5 Conclusiones

El área de construcción del proyecto se ubica en el flanco occidental de la Cordillera de la Costa, en una pampa, con elevaciones que fluctúan entre los 185 y 191 m s.n.m. y con pendientes de 2° a 5°.

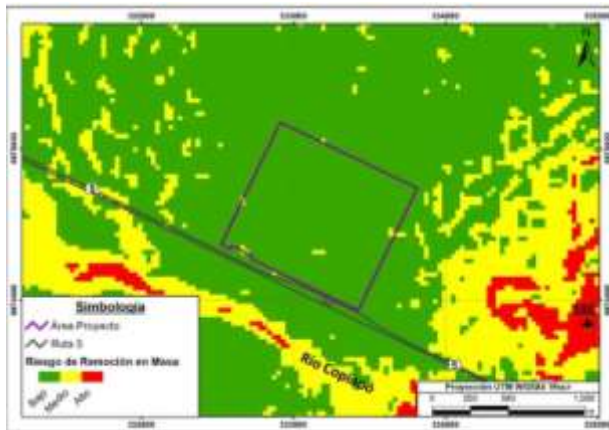


Figura 10: Riesgo de Remoción en Masa del área del proyecto.
Elaboración propia a partir de modelo Raster de las pendientes del sector del Proyecto.

En ella afloran la unidad geológica Depósitos Aluviales (Qal), la cual sobreyace, en el sector SW, a la unidad Gravas de Copiapo (MPlgc). Estos depósitos son no consolidados, polimícticos, subredondeados, de moderada a mala selección, con matriz arenosa y clastos que no superan 1 cm. El área de emplazamiento del proyecto se encuentra en zonas más distales de los depósitos aluviales, cuyo origen corresponden escorrentías de aguas superficiales esporádicas.

La unidad hidrogeológica principal del área del proyecto corresponde a Depósitos no Consolidados (gravas, arenas y limos) del valle del río, la cual se encuentra limitada por las Rocas Plutónicas de permeabilidad baja a nula. El sitio pertenece al sector acuífero N° 6, denominado Piedra Colgada-Angostura, el cual registra niveles de agua subterránea de 9,5 a 6,0 m de profundidad, por lo que las obras del proyecto que llegarán a 3 m de profundidad, no interceptarían a dicho acuífero.

Los Riesgos Geológicos identificados para el área del proyecto corresponden a Riesgo Sísmico (Riesgo Endógeno) y Remociones en Masa (Riesgo Exógeno). Los datos históricos del área dan una tasa de recurrencia de eventos sísmicos relevantes en torno a los 100 años y una línea de tendencia NNW. A partir de las características geológicas, las pendientes y el tipo de erosión, se estima un bajo riesgo de fenómenos de Remoción en Masa para el área de construcción.

6 Referencias

Araya, J. & Börgel, R. 1972. "El uso de la carta 1:50.000 del Instituto Geográfico Militar en la confección de unidades geográfico-físicas". Primer Simposio Cartográfico Nacional, Instituto Geográfico Militar: 219 pp. Santiago.

Ayala Carcedo, F. J. 1987. "Introducción a los riesgos geológicos" Riesgos Geológicos; Instituto Geológico y Minero de España (I.G.M.E). Vol. 1, 3-21 pp. Madrid.

B&Z, 2016. Línea de Base Componente Geología, Geomorfología y Riesgo Geológicos del Proyecto Energías y Aguas del Pacífico (ENAPAC), Región de Atacama, Chile. Informe inédito: 3-38 pp. Santiago.

Börgel, R. 1983. Geomorfología de Chile, Tomo II. Colección Geografía de Chile. Santiago, Instituto Geográfico Militar de Chile.

DICTUC S. A., 2010. Análisis Integrado de Gestión en Cuenca del Río Copiapó. S.I.T. N° 211. Dirección General de Aguas (DGA).

Dirección General de Aguas (DGA), 1986. Mapa Hidrogeológico de Chile. Escala 1:2.500.000. Santiago.

Dirección General de Aguas (DGA), 1989. Mapa Hidrogeológico de Chile. Escala 1:1.100.000. Santiago

Dirección General de Aguas (DGA), 2003. Evaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos del Valle del Río Copiapó. S.I.T. N° 87. Realizado por Departamento de Estudios y Planificación. Santiago.

Dirección General de Aguas (DGA), 2013. Actualización de la Modelación Integrada y Subterránea del Acuífero de la Cuenca del Río Copiapó. S.I.T. N° 332. Realizado por HIDROMAS CEF LIMITADA. Santiago.

Godoy, E.; Marquardt, C. & Blanco, N. 2003. Serie Carta Geológica de Chile N° 76, a escala 1:100.000. Servicio Nacional de Geología y Minería: 7-23.

Hauser, A., 1993. Remociones en Masa en Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago. Boletín N° 45: 1-173.

Instituto Geográfico Militar. Carta Topográfica Sierra Monardes (C-091).

Los sitios web consultados son los siguientes:

Centro Sismológico Universidad de Chile:

<http://www.sismologia.cl/>

Dirección General de Aguas (DGA). Inventario Público de Cuenclas Hidrográficas:

https://dga.mop.gob.cl/administracionrecursos_hidricos/inventario_cuenclas_lagos/

Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior.

<http://www.onemi.cl>

Servicio de Impacto Ambiental del Gobierno de Chile:

<https://sea.gob.cl/>

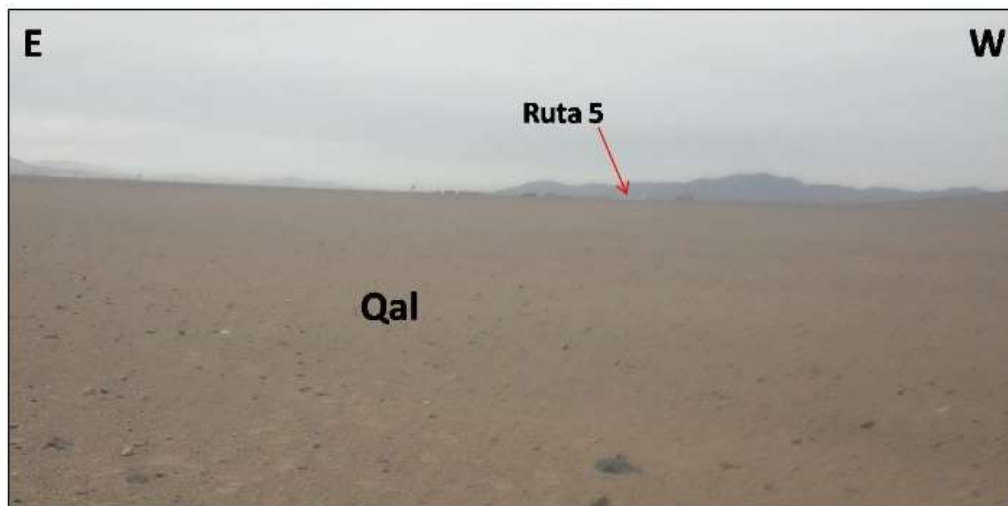
U.S. Geology Survey (USGS): <https://earthquake.usgs.gov/>



Fotografía 1: Panorámica del Área del Proyecto. Fuente: Registro fotográfico tomado en terreno.



Fotografía 2: Vista al NE. Panorámica del Área del Proyecto. Fuente: Registro fotográfico tomado en terreno.



Fotografía 3: Vista al S. Panorámica del Área del Proyecto. Fuente: Registro fotográfico tomado en terreno.



Fotografía 4: Sedimentos en el extremo norte del área.



Fotografía 5: Sedimentos de esquina este del polígono del área.



Fotografía 6: Vista al NW del Área del Proyecto.

Tabla N°1: Tabla de niveles de agua subterránea "Pozos Sub-Cuenca Río Copiapó Bajo (Hacienda Margarita (Matamoros), Hacienda Margarita, Kiosko Santa Valentina, Valle Fértil, San Camilo), período enero 2010 a enero 2017". Red de monitoreo DGA.

POZOS MONITOREO NIVELES ESTÁTICOS-DGA									
HACIENDA MARGARITA (MATAMOROS)		HACIENDA MARGARITA		KIOSKO SANTA VALENTINA		VALLE FÉRTIL (7)		SAN CAMILO (8)	
Norte (m)	6.975.461	Norte (m)	6.974.658	Norte (m)	6.974.482	Norte (m)	6.971.708	Norte (m)	6.972.212
Este (m)	341.516	Este (m)	341.307	Este (m)	339.577	Este (m)	337.003	Este (m)	335.539
Cota (m s.n.m.)	193	Cota (m s.n.m.)	189	Cota (m s.n.m.)	-	Cota (m s.n.m.)	168	Cota (m s.n.m.)	164
Fecha	Nivel (m)	Fecha	Nivel (m)	Fecha	Nivel (m)	Fecha	Nivel (m)	Fecha	Nivel (m)
30-11-2010	7,55	11-01-2010	7,43	29-07-2010	6,12	11-01-2010	6,00	12-01-2010	6,53
30-05-2011	7,68	05-03-2010	7,58	30-09-2010	6,12	05-03-2010	6,13	20-05-2010	6,52
25-07-2011	7,29	20-05-2010	7,52	30-11-2010	6,26	20-05-2010	6,07	10-09-2010	6,44
13-09-2011	7,37	29-07-2010	7,53	31-01-2011	6,27	29-07-2010	6,09	30-11-2010	6,47
29-11-2011	7,58	10-09-2010	7,37	29-03-2011	6,85	10-09-2010	6,08	31-01-2011	6,42
31-01-2012	7,71			30-05-2011	6,46	30-11-2010	6,12	18-05-2012	6,56
18-05-2012	7,93			25-07-2011	6,65	31-01-2011	6,20	31-07-2012	6,51
31-07-2012	7,89			13-09-2011	6,20	29-03-2011	6,08	11-09-2012	6,47
11-09-2012	7,88			31-01-2012	6,44	31-05-2011	6,13	14-11-2012	6,53
				15-01-2013	6,88	25-07-2011	6,08	15-05-2013	6,69
				12-03-2013	6,99	13-09-2011	6,11	30-07-2013	6,63
						29-11-2011	5,38	19-11-2013	6,67
						31-01-2012	6,21		
						22-03-2012	6,17		
						18-05-2012	6,26		
						31-07-2012	6,23		
						11-09-2012	6,20		
						14-11-2012	6,24		
						15-01-2013	6,35		
						12-03-2013	6,45		
						15-05-2013	6,42		
						30-07-2013	6,35		
						12-09-2013	6,32		
						19-11-2013	6,37		
						17-01-2014	6,42		
						27-03-2014	6,47		
						19-05-2014	6,46		
						14-07-2014	6,45		
						08-09-2014	6,44		
						02-12-2014	6,47		
						16-01-2015	6,47		
						12-03-2015	6,52		
						15-05-2015	6,54		
						13-01-2016	6,50		
						30-03-2016	6,38		
						25-05-2016	6,40		
						28-07-2016	6,80		
						21-09-2016	6,50		
						24-11-2016	6,51		
						18-01-2017	6,51		

Continuación Tabla N°1.

POZOS MONITOREO NIVELES ESTÁTICOS-DGA									
SAN CAMILO (6)		PUNTA PICAZO (5)		MONTE AMARGO (2)		HACIENDA MARIA ISABEL (4)			
Norte (m)	6.971.140	Norte (m)	6.973.220	Norte (m)	6.973.428	Norte (m)	6.974.556		
Este (m)	333.630	Este (m)	332.640	Este (m)	329.888	Este (m)	326.876		
Cota (m s.n.m.)	157	Cota (m s.n.m.)	149	Cota (m s.n.m.)	133	Cota (m s.n.m.)	119		
Fecha	Nivel (m)	Fecha	Nivel (m)	Fecha	Nivel (m)	Fecha	Nivel (m)	Fecha	Nivel (m)
12-01-2010	6,28	12-01-2010	9,47	12-01-2010	8,11	12-01-2010	5,87	26-06-2013	5,74
05-03-2010	6,23	05-03-2010	9,40	05-03-2010	8,07	26-02-2010	5,94	30-07-2013	5,74
20-05-2010	6,26	20-05-2010	9,07	20-05-2010	8,12	05-03-2010	5,86	13-08-2013	5,76
29-07-2010	6,22	29-07-2010	8,79	29-07-2010	7,96	16-04-2010	5,86	12-09-2013	5,70
30-09-2010	6,21	10-09-2010	9,36	30-09-2010	7,98	20-05-2010	5,85	29-10-2013	5,72
30-11-2010	6,21	30-11-2010	9,33	30-11-2010	7,99	30-06-2010	5,82	19-11-2013	5,73
31-01-2011	6,22	21-01-2011	9,35	21-01-2011	7,98	29-07-2010	5,79	17-12-2013	5,75
29-03-2011	6,24	29-03-2011	9,37	29-03-2011	8,07	23-08-2010	5,78	17-01-2014	5,77
31-05-2011	6,30	31-05-2011	9,41	31-05-2011	8,02	30-09-2010	5,76	21-02-2014	5,81
25-07-2011	6,26	25-07-2011	9,37	25-07-2011	7,96	14-10-2010	5,77	31-03-2014	5,81
13-09-2011	6,19	13-09-2011	9,30	13-09-2011	7,87	30-11-2010	5,75	28-04-2014	5,80
29-11-2011	6,25	22-03-2012	9,38	31-01-2012	7,99	28-12-2010	5,77	19-05-2014	5,77
31-01-2012	6,23	31-07-2012	9,30	22-03-2012	8,09	21-01-2011	5,48	18-06-2014	5,75
22-03-2012	6,29	11-09-2012	9,29	18-05-2012	8,00	18-02-2011	5,81	14-07-2014	5,62
18-05-2012	6,26	14-11-2012	9,32	31-07-2012	7,87	29-03-2011	5,61	22-08-2014	5,72
31-07-2012	6,25	15-01-2013	9,45	11-09-2012	7,86	28-04-2011	5,80	08-09-2014	5,70
11-09-2012	6,24	12-03-2013	9,45	14-11-2012	7,84	31-05-2011	5,67	16-10-2014	5,69
14-11-2012	6,26	15-05-2013	9,37	15-01-2013	8,08	30-06-2011	5,74	28-11-2014	5,72
15-01-2013	6,31	30-07-2013	9,32	12-03-2013	8,14	25-07-2011	5,75	12-12-2014	5,73
12-03-2013	6,41	12-09-2013	9,26	15-05-2013	8,13	13-09-2011	5,79	16-01-2015	5,72
15-05-2013	6,39	19-11-2013	9,34	30-07-2013	7,88	14-10-2011	5,68	17-02-2015	5,75
30-07-2013	6,29	17-01-2014	9,34	12-09-2013	7,87	29-11-2011	5,72	12-03-2015	5,63
12-09-2013	6,27	31-03-2014	9,32	19-11-2013	7,92	22-12-2011	5,75	21-04-2015	5,31
19-11-2013	6,31	19-05-2014	9,29	17-01-2014	8,00	31-01-2012	5,62	15-05-2015	5,71
17-01-2014	6,37	14-07-2014	9,30	31-03-2014	8,02	28-02-2012	5,72	13-01-2016	5,57
31-03-2014	6,37	08-09-2014	9,31	19-05-2014	7,88	22-03-2012	5,79	26-02-2016	5,58
19-05-2014	6,33	02-12-2014	9,30	14-07-2014	7,93	20-04-2012	5,79	29-03-2016	5,72
14-07-2014	6,35	16-01-2015	9,30	22-08-2014	7,88	18-05-2012	5,77	28-04-2016	5,72
08-09-2014	6,33	12-03-2015	9,26	08-09-2014	7,87	20-06-2012	5,72	24-05-2016	5,70
02-12-2014	6,35	15-05-2015	9,10	02-12-2014	7,85	31-07-2012	5,70	30-06-2016	5,68
16-01-2015	6,35	13-01-2016	9,05	16-01-2015	7,87	14-08-2012	5,69	28-07-2016	5,66
12-03-2015	6,22	31-03-2016	9,03	15-05-2015	7,92	11-09-2012	5,65	31-08-2016	5,70
15-05-2015	6,20	25-05-2016	9,01	13-01-2016	7,91	18-10-2012	5,67	21-09-2016	5,49
13-01-2016	6,10	28-07-2016	9,44	31-03-2016	7,69	14-11-2012	5,68	02-10-2016	5,63
31-03-2016	6,29	21-09-2016	8,96	25-05-2016	7,68	17-12-2012	5,71	28-11-2016	5,48
25-05-2016	6,25	24-11-2016	9,00	28-07-2016	8,18	15-01-2013	5,80	06-12-2016	5,67
28-07-2016	6,70	18-01-2017	8,96	21-09-2016	7,63	14-02-2013	5,42	18-01-2017	5,72
21-09-2016	6,23			18-01-2017	7,85	12-03-2013	5,87		
24-11-2016	6,23					15-04-2013	5,79		
18-01-2017	6,27					15-05-2013	5,83		

Tabla N° 2: Sismos Importantes y/o Destructivos cercanos a la latitud del proyecto con Magnitudes Ms mayores o iguales a 7,0 (1796 al 2017).

Fuente: GUC - NEIC en Servicio Sismológico de Chile.

Sismos Importantes y/o Destructivos (1796-2017)								
Magnitud Ms mayor o igual a 7,0								
Fecha local	Hora local	Latitud	Long.	Localidad	Magnitud Ms	Magnitud Mw	of. [km]	Efecto
30/03/1796	6:45	-27.350	-70.350	Copiapó	7,7	-	-	-
11/04/1819	10:00	-27.350	-70.350	Copiapó	8,3	-	-	Tsunami Destructor o Mayor
17/12/1849	6:00	-29.950	-71.370		7,5	-	-	Tsunami Moderado
05/10/1859	8:00	-27.350	-70.350	Copiapó	7,6	-	-	Tsunami Moderado
08-06-1909	1:00	-26.500	-70.500	Caldera	7,6	-	-	-
20-05-1918	12:57	-28.500	-71.500		7,9	-	-	-
04-12-1918	7:47	-26.000	-71.000	Caldera	8,2	-	60	Tsunami Moderado
07-11-1922	19:00	-28.000	-72.000		7	-	-	-
10-11-1922	23:53	-28.500	-70.000	Caldera	8,39	8,5	25	Tsunami Moderado
04-05-1923	17:47	-28.750	-71.750		7,0	-	60	-
18-04-1939	2:22	-27.000	-70.500		7,4	-	100	-
02-08-1946	15:19	-26.500	-70.500	Caldera	7,9	-	50	-
03-08-1979	14:11	-26.518	-70.664	Caldera	7	-	49	-
04-10-1983	14:52	-26.535	-70.563	Caldera	7,3	-	14	-
30-03-1988	19:53	-	-	Al N de Copiapó	7	-	-	-

Tabla N°3: Riesgo de Remoción en Masa según Pendientes. Fuente: Clasificación de riesgo de remoción en masa según pendiente.

Araya, Vergara y Börgel1972.

Pendientes			Proceso	Erodabilidad	Riesgo de Remoción en Masa
(º)	(%)	Pendiente			
0 - 2	0 - 4,5	Levemente horizontal	Erosión nula o leve.	Baja	Bajo
2 - 5	4,5 - 11	Suave	Erosión débil, difusa (sheetwash), inicio de regueras, soliflucción fría.	Baja	Bajo
5 - 10	11 - 22	Moderada	Erosión moderada a fuerte inicio de erosión lineal (rillwash).	Media	Medio
10 - 20	22 - 44.5	Fuerte	Erosión intensa, cárcavas insipientes.	Alta	Medio
20 - 30	44.5 - 67	Moderadamente escarpada	Cárcavas frecuentes, movimientos en masa, reptación.	Alta	Alto
30 - 45	67 - 100	Muy escarpada	Coluviamiento, soliflucción intensa.	Muy alta	Alto
45 <	100 <	Acantilado	Desprendimientos, derrumbes, corredores de derrubios.	Muy alta	Alto