



JUNIO 2022

CAPÍTULO 2

# MEDIO FÍSICO

## Tabla de Contenidos

<b>2.</b>	<b>CAPITULO II – MEDIO FISICO .....</b>	<b>1</b>
2.1	Introducción.....	1
2.2	Objetivos .....	1
2.3	Área de Estudio.....	2
2.4	Material y métodos .....	3
2.4.1	Recopilación y revisión bibliográfica .....	3
2.4.2	Elaboración de mapas.....	5
2.5	Resultados y Discusión .....	5
2.5.1	Clima y precipitaciones .....	5
2.5.2	Geología .....	7
2.5.3	Geomorfología .....	9
2.5.4	Suelos .....	11
2.5.5	Hidrogeología.....	13
2.5.6	Hidrología y Recursos hídricos.....	16
2.5.7	Riesgos geológicos .....	18
2.6	Conclusiones.....	23
2.7	Referencias.....	25

## Tablas

Tabla 1. Sismos con magnitud considerable, que han afectado a la Región de Atacama. Fuente. Elaboración Propia con información extraída de EIA (2018), Gobierno Regional de Atacama (2012). .....	22
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

## Figuras

Figura 1. Área de Estudio de la Medida RC-02 Plan de Puesta en Valor.....	3
Figura 2. Precipitación anual promedio de los últimos 30 años en la Región de Atacama (Gobierno Regional de Atacama, 2012).....	6
Figura 3. Perfil Región de Atacama (Modificado de Börgel, 1983). En el rectángulo se muestra el Área de Estudio Salar de Pedernales.....	10
Figura 4. Mapa de isopiezas con el sentido de flujo del agua subterránea en el Salar de Pedernales (Amphos 21, 2018). .....	15
Figura 5. Subcuencas y red de drenaje de la cuenca Salar de Pedernales (Codelco, 2018).....	16

Figura 6. Mapa de recursos hídricos para el Área de Estudio. Imagen obtenida mediante QGIS..	17
Figura 7. Balance hídrico cuenca Salar de Pedernales. Fuente: elaboración propia. ....	18
Figura 8. Mapa de pendientes para el sector de la cuenca Salar de Pedernales. Imagen obtenida mediante QGIS. ....	20
Figura 9. Mapa de quebradas identificadas en el área abarcada por el Proyecto Rajo Inca. El recuadro negro enmarca el área descrita en este punto (Codelco, 2018). ....	21

## 2. CAPITULO II – MEDIO FISICO

### 2.1 Introducción

En el contexto de la existencia de la demanda interpuesta por Daño Ambiental por parte del Consejo de Defensa del Estado (CDE), y en el marco del Avenimiento y Transacción entre las partes, Codelco División Salvador (DS) y el CDE acordaron una serie de medidas, entre las cuales se incluyen las asociadas a Sistemas Vegetacionales Azonales Hídricos Terrestres (SVAHT). Dentro de estas medidas se encuentra el Plan de Compensación, que contempla un Plan de Reparación Ex - Situ por una parte (Medida RC-01) y un Plan de Puesta en Valor de características y magnitud suficientes (Medida RC-02), de forma tal de hacerse cargo de los efectos negativos producidos en el Salar de Pedernales.

La Medida RC-02 corresponde a un conjunto de medidas de puesta en valor del Plan de Compensación las cuales se desarrollarán en: cuenca del Salar de Pedernales (SVAHT activo), en los Salares La Laguna y Piedra Parada, en quebrada Asiento, en quebrada Leoncito y en todas las áreas, en buen estado y reparadas, de las quebradas aledañas de agua dulce en que se propone realizar reparación ex-situ, que se identifican en el acápite 3 de este documento.

El objetivo del proyecto “Plan de Puesta en Valor de Salar de Pedernales” es desarrollar un Plan de Puesta en Valor en las áreas de afectación de los Sistemas Vegetacionales Azonales Hídricos Terrestres (SVAHT) en la cuenca del Salar de Pedernales, para establecer la base de información de componentes ambientales y actores clave en el área, y su difusión a través de diversos canales. Se espera así contribuir a la disminución de la brecha de conocimiento científico de estos ecosistemas y la generación de un flujo sostenido de beneficios culturales, sociales y económicos para las comunidades aledañas al área de afectación.

En el presente capítulo se presentan los resultados parciales que permiten establecer una caracterización del medio físico del Área de Estudio de la Medida RC-02 Plan de Puesta en Valor.

### 2.2 Objetivos

El objetivo de este capítulo es describir y contextualizar el medio físico del Área de Estudio que forma parte de la medida RC-02 Plan de Puesta en Valor. Los rasgos físicos han sido considerados en base a los siguientes términos:

- **Clima y precipitaciones:** descripción de los factores y eventos meteorológicos, y de la tasa de precipitaciones a escala regional.
- **Geología:** descripción de litologías, alteración hidrotermal y estructuras que están presentes en el Área de Estudio.
- **Geomorfología:** enfocado en las geformas en donde está comprendida el Área de Estudio para comprender la presencia y ubicación de los salares prealtiplánicos.
- **Suelos:** Descripción general de los suelos del Sector Altiplánico, con especial énfasis en la pedogénesis y las características de los suelos orgánicos de vegas y bofedales.

- **Hidrogeología:** permite identificar las unidades hidrogeológicas y los tipos de depósitos sedimentarios y unidades rocosas que almacenan acuíferos de baja, media y alta importancia hídrica.
- **Hidrología y recursos hídricos:** permite conocer los recursos hídricos disponibles en el Área de Estudio con respecto al clima y tasas de recarga y salida de agua a los acuíferos disponibles.
- **Riesgos geológicos:** descripción de los peligros y riesgos geológicos que se pueden identificar en el Área de Estudio según diferentes factores gatillantes que inducen a estos. En estos riesgos geológicos también se presentan las precipitaciones que abarca el clima de la zona de estudio.

## 2.3 Área de Estudio

El Área de Estudio está ubicada en la Gran Fosa de Salares Preatiplánicos y localizada en la Región de Atacama de Chile, en la comuna de Diego de Almagro, a 40 km al este de la ciudad El Salvador, a los 26°14'31"S y 69°09'59"W. En este capítulo, no se considera la limitación de los diferentes ecosistemas SVAHT, sino que el contexto de medio físico involucra a toda el área comprendida en las diferentes cuencas que abarcan el Área de Estudio. Específicamente, el Área de Estudio está dividida en 13 sectores distribuidos en las siguientes 5 cuencas, a detallar (DGA, 2017)<sup>1</sup>:

- Cuenca del Salar de Pedernales: con los sectores salar de Pedernales, La Ola, Leoncito, Pastos Largos, quebrada Río Negro y quebrada Tordillos;
- Cuenca de La Laguna: con el sector salar de la Laguna;
- Cuenca Salar de Piedra Parada: con el sector salar de Piedra Parada;
- Cuenca Salar de Maricunga: con el sector Vertientes 2;
- Cuenca del Río Salado: con los sectores quebrada Asiento, quebrada Ciénega, El Colorado y quebrada Tinaja/Trojitas.

Si bien, estos 13 sectores se encuentran distribuidos en cinco cuencas, para el presente capítulo, la información tendrá especial énfasis en la cuenca del Salar de Pedernales. Esto debido a que es la cuenca que i) abarca mayor número de sitios, ii) tiene mayor superficie dentro de las 34 cuencas altoandinas (3582,3 km<sup>2</sup>) de la Región de Atacama (Amphos21, 2016) y iii) presenta mayor disponibilidad de información de los componentes descritos en este capítulo.

La principal vía de acceso para la Región de Atacama es la Ruta 5 Norte, que permite el acceso a las principales ciudades, tales como Chañaral, Caldera, Copiapó y Vallenar. Posteriormente es la ruta C-13 que permite el acceso al valle del Río Salado y que permite acceder hasta la comuna de Diego de Almagro, en donde, dirigiéndose hacia el este, se puede acceder a las rutas C-163 y C-173 que le dan continuidad al camino en la zona precordillerana accediendo hasta el Salar de Pedernales (Figura 1).

---

<sup>1</sup> Basado en la capa vectorial de cuencas altiplánicas de la DGA (2017), ofrecida por la IDE del SNIT: [Catálogo Nacional de Información Geoespacial \(geoportal.cl\)](http://catologo.nacional.de.informacion.geoespacial(geoportal.cl))

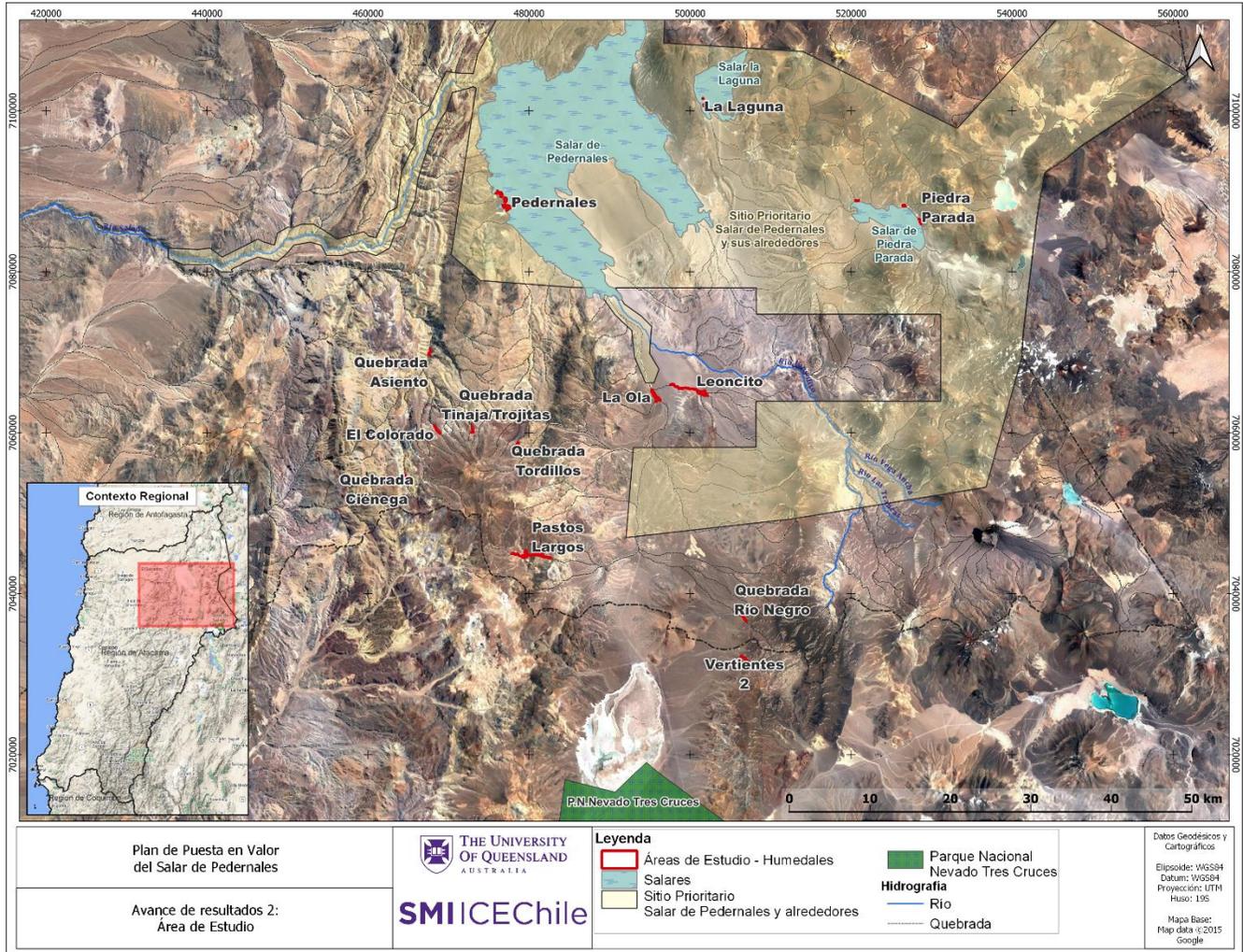


Figura 1. Área de Estudio de la Medida RC-02 Plan de Puesta en Valor.

## 2.4 Material y métodos

### 2.4.1 Recopilación y revisión bibliográfica

Con el fin de identificar y comprender la geología, hidrogeología, recursos hídricos y los riesgos geológicos asociados al Área de Estudio, se revisó información bibliográfica de diferentes tipos y fuentes, asociada principalmente a la cuenca Salar de Pedernales. Específicamente, para el análisis desarrollado en este informe, se utilizaron:

Cartas geológicas:

- Hidrogeología de la Cuenca Salar de Pedernales, Región de Atacama (Aguirre y Venegas, 2005).
- Hoja Potrerillos, Región de Atacama. Escala 1:100.000 (Tomlinson *et al.*, 1999).

#### Documentos técnicos:

- Adenda Complementaria Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Rajo Inca (Codelco, 2019).
- Diagnóstico amenazas naturales y exposición sistemas estratégicos. Informe final (Gobierno Regional de Atacama, 2012).
- Diagnóstico de disponibilidad hídrica en cuencas Alto-Andinas de la Región de Atacama, Fase 2 (DGA, 2015).
- Diagnóstico de disponibilidad hídrica en cuencas Alto-Andinas de la Región de Atacama, Fase 3 (Amphos 21, 2016).
- Estudio de impacto ambiental Proyecto Rajo Inca (Codelco, 2018): Capítulo 3: Línea de base (sección A) Medio Físico.
- Estudio Hidrogeológico Cuenca Salar de Pedernales y Zona de aducciones de Agua Dulce (Amphos 21, 2014).

#### Libros científicos:

- Bioestratigrafía del Jurásico de Quebrada Asientos, Norte de Potrerillos, Región de Atacama (Pérez, 1982).
- Geomorfología (Börgel, 1983).
- Climatología. (Köppen, 1948).
- Ingeniería Geológica (González et al., 2002).
- Suelos de Chile. (Luzio, 2010).

#### Publicaciones científicas:

- Riscos geológicos: aspectos conceituais (Augusto-Filho *et al.*, 1990).
- Guía descriptiva de los sistemas vegetacionales azonales hídricos terrestres de la ecorregión altiplánica (SVHAT) (Ahumada y Faundez, 2009).
- Varnes, D., 1978. Slope movement types and processes. (R. Schuster, & R. Krizek, Edits.) Washington D.C.: Transportation and Road research board, National Academy of Science.

#### Recurso en línea:

- Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN)
- Peligros Geológicos (consultado el 27 de abril de 2022)
- Red Nacional de Vigilancia Volcánica (consultado el 27 de abril de 2022).

#### Memorias de título:

- Simulación hidrogeológica para la explotación del acuífero ubicado en la quebrada Potrero Grande, región de Atacama (Luchinger, 2013).

- Análisis de susceptibilidad a remociones en masa en la comuna de Corral, al norte de los 39°54's, región de los Ríos, Chile (Henríquez, 2019).

## 2.4.2 Elaboración de mapas

Para generar la cartografía de apoyo, se hizo uso del software QGIS (Quantum GIS) que es un sistema de información geográfica (SIG) de uso libre. Se elaboraron 3 mapas: mapa de pendiente, mapa de recursos hídricos y mapa de infraestructura hídrica. El detalle se entrega a continuación:

- Mapas de pendientes y orientaciones: estos mapas fueron generados a partir de un modelo de elevación digital (DEM) descargados en la página web de la NASA.
- Mapa de recursos hídricos: la elaboración de este mapa se realizó con archivos shape descargados de la sección de mapas vectoriales de la página del Congreso Nacional.
- Mapa de Infraestructura Hídrica: este mapa fue realizado en base a archivos KMZ entregados por Codelco.

## 2.5 Resultados y Discusión

Como se menciona previamente, los diferentes componentes presentados en resultados han sido contextualizados principalmente para la cuenca Salar de Pedernales. Para esto es necesario identificar los rasgos geomorfológicos, geológicos, hidrogeológicos, hidrológicos, los recursos hídricos, y finalmente los riesgos geológicos disponibles que están asociados al sector. Estos son presentados a continuación:

### 2.5.1 Clima y precipitaciones

La región de Atacama posee características climáticas determinadas principalmente por la presencia del Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur y la corriente fría de Humboldt. Estos, factores más la compleja topografía de la región, son las que determinan la baja tasa de precipitación de la zona, dando como resultado una región árida y con extensas superficies desprovistas de vegetación (Gobierno Regional de Atacama, 2012). Considerando la caracterización del clima según la clasificación general y universal (Köppen), la Región de Atacama se caracteriza por un clima semiárido y por la presencia de desiertos (Codelco, 2018).

El informe desarrollado por Codelco (2018) menciona que la región está dividida en 5 subclimas:

- Clima desértico litoral o árido con nublados abundantes
- Clima desértico de interior o normal
- Clima desértico marginal
- Clima desértico marginal de altura
- Clima de Tundra de Alta Montaña

Este mismo informe detalla que el Proyecto Rajo Inca abarca los cinco subclimas, pero esta principalmente influenciado por el clima desértico marginal y el clima desértico marginal de altura. En

las cuencas andinas se producen precipitaciones orográficas, donde las tormentas de invierno son la principal fuente hídrica; se presentan en forma de nieve entre los meses de junio y septiembre. Por otra parte, las tormentas estivales asociadas al invierno altiplánico producen precipitaciones en forma líquida, siendo menor la influencia hídrica en el sector (DGA, 2015). La etapa del año donde los acuíferos reciben una mayor recarga o entrada de agua es entre los meses octubre y febrero, donde ocurren los deshielos (Luchinger, 2013).

En cuanto a las precipitaciones desarrolladas específicamente en el área comprendida entre el Salar de Pedernales y el Tranque de Relaves Pampa Austral, según el análisis realizado en el Estudio de Impacto Ambiental Rajo Inca (Codelco, 2018), con la información pluviométrica de las estaciones próximas al Proyecto Rajo Inca, se observó que las precipitaciones acumuladas anuales entre 2015 y 2017 en promedio no sobrepasan los 42 mm anuales. Sin embargo, en 2015 se produjeron precipitaciones excepcionales, permitiendo acumular más de 100 mm ese año.

En la Figura 2 se puede ver la distribución de precipitaciones anuales promedio en un periodo de 30 años dentro de la Región de Atacama.

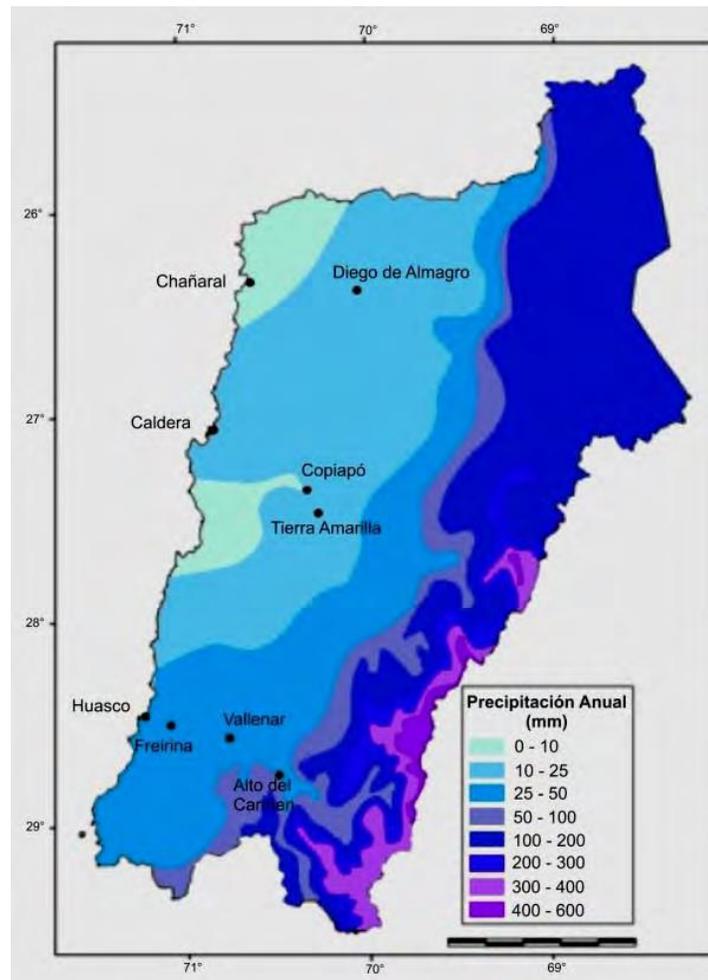


Figura 2. Precipitación anual promedio de los últimos 30 años en la Región de Atacama (Gobierno Regional de Atacama, 2012).

## 2.5.2 Geología

Debido a que el Área de Estudio está comprendida entre 13 sectores distribuidos a lo largo de la cuenca del Salar de Pedernales, la disponibilidad de información es un factor que afecta para la descripción geológica completa del sector. En este caso, para la geología local, se ha enfocado la descripción en el Salar de Pedernales principalmente.

### 2.5.2.1 Geología regional Cuenca Salar de Pedernales

De manera regional, la existencia de estos salares altioplánicos se debe a la tercera etapa de alzamiento orogénico el cual dio formación a la Cordillera de Domeyko (Codelco, 2018) durante el período Triásico. Esta cordillera tiene una elongación N-S y está principalmente dominada por fallas relativamente actuales de tipo inversas de alto y bajo ángulo, y por fallas extensionales antiguas de alto ángulo, las cuales posteriormente fueron reactivadas con un carácter inverso (Amilibia y Skarmeta, 2003). La formación de esta cordillera alzo las formaciones geológicas por sobre los 5000 m s.n.m y encerró a los flujos de agua que descargaban hacia el mar generando cuencas endorreicas tal como la cuenca del Salar de Pedernales (Codelco, 2018).

Las altas pendientes que hay en los bordes de esta cuenca conducen los cauces de agua a la depresión central del Salar. La erosión, como consecuencia de estos cauces de agua, han generado una serie de llanos en la zona central de la cuenca, donde uno de estos llanos corresponde al Llano Pedernales, el cual alberga al Salar de Pedernales. En el caso del Salar de Pedernales, al estar presente en una cuenca endorreica favorece una alta tasa de evaporación por lo que predominan las sales y por ende presenta un carácter evaporítico. Gran parte de esta morfología está formada por acumulación de material volcánico y rocas hipoabisales. (Codelco, 2018).

### 2.5.2.2 Geología local Salar de Pedernales

La geología local de la zona específica del Salar de Pedernales es descrita en base a la Hoja Potrerillos de Tomlinson y colaboradores en 1999.

En el Área de Estudio donde está ubicado el Salar de Pedernales se presentan rocas estratificadas tales como rocas volcánicas, sedimentarias, volcano-sedimentarias y rocas no estratificadas como rocas intrusivas, además de depósitos de rocas no consolidados que abarcan depósitos aluviales, fluviales, coluviales y de remoción en masa. Estas rocas tienen una disposición preferencial NS y NE y abarcan edades que van desde el período Pérmico hasta el Cuaternario.

Al norte y noreste del Salar de Pedernales están depositadas las rocas volcánicas denominadas como Aparatos Volcánicos Centrales y Campos de Lavas, de edad Mioceno Medio (17-11 Ma), distribuidas principalmente en dirección NE, y que comprende a centros volcánicos compuestos por domos centrales, flujos piroclásticos y lavas medianamente erosionadas.

Al oeste del Salar de Pedernales se encuentran secuencias volcano-sedimentarias de origen continental y marino, las cuales se denominan Formación Montandón, Formación Asientos y Formación Pedernales, de edad Jurásico Inferior-Medio-Cretácico Inferior (198-139 Ma) y que están distribuidas preferentemente en dirección NE. En primer lugar, la Formación Montandón, de edad Jurásico Inferior, corresponde a una secuencia sedimentaria marina compuesta por calizas y calcilitas fosilíferas, la cual al norte de la Quebrada Asientos presenta intrusiones concordantes de filones andesíticos-

basálticos. Por otra parte, la Formación Asientos, de edad Jurásico Medio y la cual sobreyace concordantemente a la Formación Montandón, corresponde a una secuencia volcanosedimentaria de origen continental-marino y que está compuesta por una alternancia de calizas fosilíferas y areniscas volcanoclásticas con intercalaciones de lavas basálticas. Esta formación en la Quebrada Asientos presenta calizas fosilíferas las cuales alternan con areniscas calcáreas y volcarenitas con presencia de fauna fósil. Finalmente, la Formación Pedernales, de edad Cretácico Inferior y que sobreyace a la Formación Asientos, está compuesta por una alternancia de calizas y areniscas calcáreas fosilíferas con intercalaciones de areniscas volcanogénicas.

En la zona S y SW del Salar de Pedernales se observan rocas ígneas intrusivas compuestas por dos batolitos principales: Batolito Pedernales y Batolito Sierra Castillo, ambos del período Pérmico, los cuales se disponen principalmente en orientación NS y que además corresponden a las rocas de mayor edad presentes en sectores aledaños al Salar de Pedernales. En ambos batolitos destaca la presencia de dioritas, granodioritas, monzogranitos y granitos, además de que los principales minerales máficos que predominan en estas rocas son biotita, anfíbola, feldespato potásico, plagioclasa sódica, cuarzo, y subordinadamente piroxeno, además de zonas alteradas hidrotermalmente por epidota y clorita.

Al este del Salar de Pedernales se presentan rocas volcánicas y volcano-sedimentarias de origen continental las cuales están distribuidas principalmente NS y abarcan edades entre Oligoceno y Mioceno Medio. En primer lugar, está el Complejo volcánico de Cerro Punta Amarilla-Pampa, de edad Oligoceno Superior-Mioceno Inferior, compuesto por extensos flujos piroclásticos, domos y lavas andesíticas y dacíticas. Por otra parte, están los Estratos de Llano Los Gases Blancos, de edad Oligocena, y que corresponde a una secuencia volcanoclastica y sedimentaria. Finalmente, y de edad Miocena se observa también la Formación Aparatos Volcánicos Centrales y Campos de Lava los cuales fueron descritos previamente.

Sobreyacendo a las formaciones y unidades nombradas previamente, se encuentran los Depósitos Sedimentarios del Mioceno Superior-Plioceno (10-5 Ma) y los depósitos aluviales y coluviales del período Cuaternario. En primer lugar y asociado a depósitos sedimentarios del Mioceno-Plioceno, están los Depósitos Aluviales Antiguos, ubicados principalmente en la zona N, S y W del Salar de Pedernales y distribuidos de manera NE, compuestos por bancos de sedimentos tamaño grava y bloques. En segundo lugar, y ubicados principalmente en el Salar de Pedernales, están los Depósitos Salinos antiguos del Salar de Pedernales y los Depósitos Salinos recientes del Salar de Pedernales, compuestos por costras, sales y limos salinos. Finalmente, del período Cuaternario, sobreyacen los depósitos aluviales y coluviales que se ubican en casi todo el borde del Salar pero que predominan en el sur.

### **2.5.2.3 Geología estructural**

La región está emplazada en el segmento sur del Sistema de Fallas de Domeyko, región especialmente activa durante la Fase Incaica, de cinemática transpresiva sinistral de la época eocena, que afectó a la precordillera de Antofagasta y Atacama (Tomlinson *et al.*, 1999). La configuración actual del margen occidental de la cuenca del Salar de Pedernales se relaciona directamente con el segmento sur del Sistema de Fallas de Domeyko, que limita al este con la Pampa Austral dando paso a la precordillera, que en esta zona es representada por la Cordillera de Domeyko (Codelco, 2018).

La región posee características estructurales relevantes, destacando actualmente la falla regional de rumbo NS Sierra Castillo, de edad Jurásica pero que comenzó como una falla normal NS de bajo ángulo. Esta es el elemento estructural más relevante de la zona correspondiendo a una falla activa comprendida entre Sierra Exploradora y la Quebrada El Asiento. En esta última zona es posible evidenciar un cinturón de plegamiento y fallamiento inverso, esto evidencia el régimen transpresivo siniestral que dominaría posteriormente durante el Cretácico Superior-Paleoceno (Pérez, 1982; Tomlinson *et al.*, 1999).

Un número importante de las estructuras identificadas en la zona se encuentran asociadas al Batolito de Pedernales. El resto de las estructuras se relacionan con la Cordillera Claudio Gay, el Volcán Doña Inés y los Domos de Esperanza (Amphos 21, 2014).

Algunas fallas mayores presentes en la zona son: Falla La Ciénaga, es una falla de rumbo sinistral similar a la falla Salitral que forma parte de un sistema de fallas subverticales de rumbo NNW; las Fallas Bailey Willis y La Cuesta, que son fallas inversas con orientación N-S; la Falla Agua Amarga, que es una falla invertida de orientación N-S a NNE-SSW; las Fallas Caballo Muerto y Portezuelo Codocedo, ambas inversas y con orientación N-S a NNE-SSW; y la Falla el Choclo, que es una falla inversa y posee orientación NNE-SSW. Finalmente, asociadas al alzamiento regional, destaca la existencia de varias fallas de rumbo NE-SW, NW-SE y N-S, que intersectan complejos volcánicos, gravas y depósitos salinos (Codelco, 2018).

### 2.5.3 Geomorfología

La Región de Atacama pertenece al conjunto regional denominado “Región septentrional de las pampas desérticas y cordilleras pre altiplánicas”. Según el perfil transversal orientado de mar a cordillera indica un ascenso gradual desde 0 m s.n.m. a nivel del Océano Pacífico hasta alturas mayores a los 5000 m s.n.m., encontrando los siguientes diez elementos zonales:

1. El farellón costero
2. La planicie litoral
3. Los llanos de sedimentación continental en las desembocaduras al mar de ríos y quebradas
4. La cordillera de la costa y sus depresiones intermedias
5. La gran pampa central desértica
6. Los pediplanos y los sistemas de glaciares o pediments
7. La precordillera andina
8. La gran fosa de los salares prealtiplánicos
9. La cordillera prealtiplánica
10. El altiplano chileno

El perfil altitudinal de la región de Atacama, en el sector donde se emplaza el Área de Estudio, es el que se detalla a continuación en la Figura 3.

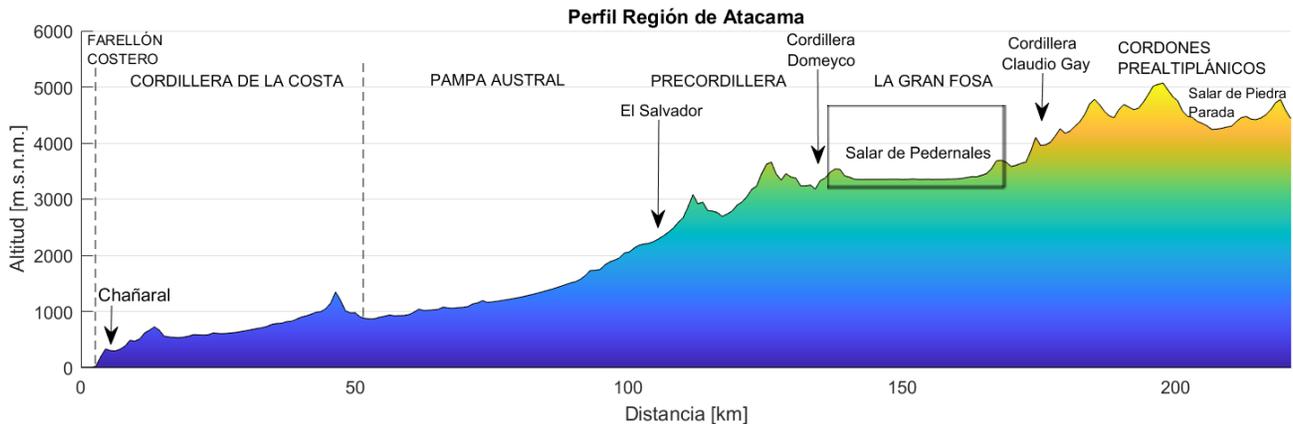


Figura 3. Perfil Región de Atacama (Modificado de Börgel, 1983). En el rectángulo se muestra el Área de Estudio Salar de Pedernales.

Según Börgel (1983), el Área de Estudio se inserta en la unidad zonal denominada la gran fosa de los salares prealtiplánicos descrita al este de la precordillera donde se desarrollan varias fosas extendidas de norte a sur abarcando una longitud de 900 km. En ella se distinguen tres secciones importantes en la morfología de estas cuencas:

- La Depresión Longitudinal Prealtiplánica, en la que encauzan sus cursos de aguas el río Lauca en el norte y el río Loa superior en el sur.
- La Gran Fosa de los Salares Prealtiplánicos, constituyendo una sola unidad geomorfológica entre el salar de Atacama en el norte y el Salar de Maricunga en el sur.
- La Depresión de los Salares Cautivos Prealtiplánicos, situados al este de la Gran Fosa, sobre la puna de Atacama.

El Área de Estudio se emplaza en la sección de la Gran Fosa de los Salares Prealtiplánicos, donde se ubica el Salar de Pedernales entre otros nueve salares más. Corresponde a todo el ámbito depresivo prealtiplánico y es uno de los rasgos morfológicos más interesantes del extremo norte de Chile (Börgel, 1983). Existen escasas referencias bibliográficas para su descripción; sin embargo, se ha establecido que su alineamiento norte-sur marca un origen tectónico.

Respecto al origen de los salares de la Región de Atacama, se discute la génesis de las depresiones donde se depositan y el origen del carácter químico de los depósitos de sal o evaporitas, resaltando un origen tectónico para explicar la independencia orográfica y considerando el carácter volcánico más las acciones hidrotermales que podrían explicar las concentraciones de sales en las aguas de los ríos. Además, se señala que existe incertidumbre en la determinación de las características específicas y de las causas por la cual cada salar presenta depósitos minerales diferentes (bórax, litio, sodio, potasio, calcio, etc.).

Las formas de cómo se conectaron y se relacionaron las diferentes depresiones, tanto altiplánicas como de la Gran Pampa Central, es bastante compleja, y se atribuye a causas tectónicas o cataclismáticas, sismos violentos y otros eventos que pudieron ocasionar la ruptura de diques naturales de contención, vaciando las aguas por un sistema de tributarios comunicantes entre las depresiones situadas sobre los 4000 m s.n.m. y aquellas establecidas solo a 1000 m s.n.m. Cabe destacar que las relaciones

orográficas y de drenaje son muy estrechas, funcionando de acuerdo con el principio de los vasos comunicantes (Börgel, 1983). Esta descarga habría tenido tres momentos o etapas:

1. Rebalse generalizado por encima de los portezuelos de la precordillera, lo que habría originado los salares de la pampa.
2. Expulsión violenta de las aguas de la gran fosa, por agrietamientos mayores en la precordillera. La apertura de los portezuelos en el sector septentrional de la fosa habría originado las profundas quebradas del N de Chile, las que evidencian el efecto erosivo de un solo gran golpe de aguas con dinámica de arrasamiento hasta la desembocadura en el mar.
3. Ocurrida en los portezuelos del sector meridional, en particular el de Maricunga, que ha desaguado a la gran fosa por un efecto de rebalse, a través de la Quebrada de Paipote hacia el Océano Pacífico.

#### **2.5.4 Suelos**

Según la clasificación de Luzio (2010), el Área de estudio se encuentra en la zona edáfica identificada como “Suelos de la Zona Desértica”, la cual se sitúa entre los 18° latitud sur hasta los 29° latitud sur.

Basado en la clasificación propuesta para los suelos de Chile (Luzio, 2010), el medio edáfico formaría parte de los suelos ubicados del Sector Altiplánico, donde el paisaje se compone de planos remanentes muy disectados, lomajes y colinas precordilleranas y un núcleo montañoso escarpado, surcado por quebradas, algunas de las cuales mantienen cierta utilización agrícola en sus partes bajas. Según las características de los suelos, se han clasificado los siguientes grupos:

- I. Suelos esqueléticos, son suelos de desarrollo incipiente, en los cuales solamente es posible distinguir un horizonte A con escasa acumulación de materia orgánica sobre un sustrato que, generalmente, no presenta evolución pedogénica.
- II. Suelos con pedogénesis incipiente, presentan procesos pedogénicos más intensos y evidenciados por horizontes cámbicos.
- III. Suelos formados en materiales volcánicos recientes, que han sido cubiertos por sedimentos de origen volcánicos con escasa evolución pedogénica a causa de la escasa disponibilidad de agua.
- IV. Suelos saturados en cuencas depresivas del paisaje (Vegas, Bofedales), se encuentran en cuencas con drenaje restringido y en algunos casos, impedido, con alto contenido de materia orgánica y acumulaciones salinas.
- V. Suelos de los Valles Cordilleranos, casi la totalidad son de origen aluvial y solo algunos coluviales.

Respecto a los suelos saturados en cuencas depresivas del paisaje, es posible describir las características de vegas y bofedales. Las vegas se ubican en planos de relieve deprimido, asociados a sectores de inundación de cursos de agua y de ríos, donde se crean condiciones de drenaje pobre y gran riqueza de vegetación con crecimiento rizomastoso, desarrollando un césped parejo o con

desarrollo de pequeños cojines herbáceos, los cuales se encuentran en su mayoría sobre suelos minerales ricos en materia orgánica. En cambio, existen otras situaciones, asociadas a cuencas cerradas de drenaje impedido, donde se han dado las condiciones para la acumulación de mayor cantidad de materia orgánica, a estos suelos o áreas de suelos se les denomina localmente como bofedales, los que, en base a la geomorfología y condiciones hidrológicas, pueden encontrarse en laderas, quebradas y planos con especies vegetales de crecimiento en cojines en forma compacta semiglobosa y especies que crecen formando césped corto (Ahumada y Faúndez, 2009; Luzio, 2010).

En los perfiles de estos suelos es posible reconocer una serie de características que influyen en su morfología, entre las que destacan contener una masa compacta de materia orgánica en distintas fases de descomposición; un drenaje restringido, fácilmente distinguido por la abundancia de rasgos redoximórficos (como empobrecimiento o enriquecimiento de óxidos de Fe); niveles freáticos que pueden alcanzar la superficie (en la época de las lluvias); y por último, en diversos casos los contenidos de sales pueden llegar a ser muy elevados.

La acumulación de sales y la formación de condiciones de reducción en cuencas exorreicas, está impedida por variaciones en el nivel freático, el que se encuentra en movimiento constante. En cambio, en cuencas endorreicas, se facilita la acumulación de sales, que pueden llegar a constituir una costra dura en la superficie, conformada principalmente por carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ).

Si bien la descomposición de la materia orgánica puede ser muy lenta debido a los efectos del encharcamiento y la oligotrofia sobre la actividad microbiana, a lo largo del tiempo se mantiene un nivel mínimo de descomposición. Los contenidos de carbono orgánico pueden ser muy variables e irregulares en su distribución en profundidad, debido a la estratificación de los suelos, sin embargo, constituyen un reservorio importante de carbono en estos ecosistemas.

El tipo de pedón más común corresponde a aquel que presenta horizontes orgánicos Fíbricos en superficie y Sápricos en profundidad, constituyendo un fango saturado a causa de la presencia del nivel freático (condiciones Ácuicas).

En cuanto a las propiedades químicas, Luzio (2010) describe que, en general, en suelos orgánicos del Altiplano, el pH de los horizontes superficiales está dentro del rango moderadamente alcalino, con una leve disminución en profundidad, hasta ligeramente alcalino o neutro en los horizontes más profundos. Sin embargo, en otros casos se presenta la tendencia a mantenerse dentro del rango ligeramente alcalino en los horizontes subsuperficiales y, solo en los horizontes más profundos, el pH se encuentra en el rango ácido. A esa profundidad, a causa de la carencia de oxígeno, el S se encuentra en formas de sulfuros, el cual en contacto con el oxígeno se transforma en sulfatos, lo que explicaría el pH ácido.

En el caso de la conductividad eléctrica (CE), en la mayoría de estos suelos es mayor en horizontes superficiales que en profundidad. Sin embargo, los niveles de conductividad pueden presentar una gran variabilidad, lo cual se ha atribuido en mayor medida a la posición de los suelos en el paisaje y su relación con los niveles freáticos. Se han descrito suelos con niveles freáticos en movimiento, que constituyen flujos subsuperficiales de agua, impidiendo la acumulación de sales y determinando a los suelos como no salinos, incluso en bofedales ubicados en una posición depresiva del paisaje. Por el contrario, la CE puede ser tan alta en horizontes superficiales con un leve decrecimiento en profundidad, a causa de la acumulación de sales atribuida a las condiciones generadas por la ubicación en cuencas endorreicas con drenajes restringido.

Los suelos orgánicos hidromórficos del Altiplano deben considerarse como suelos recientes ya que el material parental corresponde a depósitos orgánicos en cuencas originadas por procesos tectónicos y actividad volcánica. Además, se considera que para estos suelos los procesos de adición son los más importantes ya que representan una profunda y constante paludización que ha originado una marcada estratificación en la mayoría de los suelos (Histosoles), en conjunto con las acumulaciones de sales solubles provenientes de la meteorización de los materiales volcánicos en las partes más altas de la cuenca.

Los procesos de translocación están representados principalmente por las redistribuciones de sales solubles a través de los perfiles, cuya intensidad en general, es muy limitada.

Finalmente, la mayoría de estos suelos orgánicos han sido clasificados como Haplofibrist y Haplohemist. Algunos también son altamente salinos, con una CE que puede llegar a los 150 dS m<sup>-1</sup>, por lo que se les ha clasificado como Endoaquents y Halaquepts/Endoaquepts.

### 2.5.5 Hidrogeología

Para este componente del medio físico, al igual que en el capítulo “2.5.2 Geología”, el área descrita no abarca el 100% de lo que se define como Área de estudio en este informe, y se restringe a la descripción de la zona del Salar de Pedernales y sus alrededores.

En el sector del Salar de Pedernales se ha identificado un sistema acuífero constituido por dos tipos fundamentales de Unidades Hidrogeológicas con diferentes propiedades en cuanto a su composición, origen, distribución espacial y comportamiento hidráulico. Estos dos tipos de unidades hidrogeológicas se clasifican en: detríticas y fracturadas. Los materiales detríticos han sido identificados fundamentalmente en el área del Salar de Pedernales, Llano de Pedernales y Pedernales Sur. Los materiales rocosos fracturados normalmente se disponen bajo la cobertura detrítica (Codelco, 2018).

Una de las unidades identificada como formadora de acuíferos con gran importancia hidrogeológica, corresponde a depósitos no consolidados a semi consolidados y se presentan en depósitos aluviales del Cuaternario y en depósitos aluviales del Mioceno Superior–Plioceno, ambos con continuidad hidráulica (Aguirre y Venegas, 2005).

Estos depósitos de rocas albergan a los acuíferos de alta importancia hidrogeológica. En el caso de los depósitos fluviales del Cuaternario, se encuentran acuíferos libres con espesor variable que alcanzan hasta decenas de metros. Estos acuíferos se restringen a los cauces actuales del Río Juncalito, La Ola y Leoncito, los cuales además poseen una recarga permanente desde las cabeceras de la cuenca de cada río. La mejor calidad de estas aguas se encuentra en las zonas de cabeceras de cada río. En el caso de los depósitos aluviales del Mioceno Superior y Plioceno, los acuíferos corresponden a acuíferos variando de libres a semiconfinados, que cubren grandes extensiones con espesores variables. En este caso, estos acuíferos tienen recargas importantes en las zonas apicales pero aplicables principalmente en las etapas de los deshielos desde octubre a febrero. En estos acuíferos, la mejor calidad de las aguas se encuentra en las zonas de cabeceras de las subcuencas. Finalmente, los depósitos aluviales del Plioceno y Cuaternario presentan acuíferos libres, semiconfinados y multicapas, debido a la progradación de los abanicos aluviales. Estos acuíferos cubren grandes extensiones con espesor variable y tienen una recarga anual principalmente en las etapas de deshielos. Al igual que en los otros tipos de depósitos de rocas, la mejor calidad de agua se encuentra en la zona de cabeceras de las

subcuencas. En los dos primeros depósitos de rocas descritos se encuentra un alto a moderado potencial hidrogeológico, mientras que en el último depósito de roca descrito se encuentran acuíferos con muy alto a alto potencial hidrogeológico (Aguirre y Venegas, 2005; Luchinger, 2013).

Litológicamente los depósitos sedimentarios fluviales del Cuaternario presentan material de tamaño grava y arena, clasto soportadas y polimícticas, con buena esfericidad y redondeamiento, selección moderada y que están sobreyacendo a los depósitos aluviales del Mioceno Superior y Plioceno. Por otra parte, estos depósitos aluviales del Mioceno Superior-Plioceno presentan gravas y bloques con una matriz de arena y limos polimícticos, con mala selección, redondeamiento y esfericidad. Finalmente, los depósitos aluviales y coluviales del Cuaternario están compuestos por gravas y arenas polimícticas, soportadas en una matriz de arena fina a limo, con moderada a mala selección, esfericidad y redondeamiento.

Específicamente en el sector de Pedernales, que involucra al Salar de Pedernales, el Llano de Pedernales y Pedernales Sur ubicados en el sector centro de la cuenca del Salar de Pedernales, se encuentran los acuíferos limitando en la parte inferior con el basamento impermeable, mientras que de manera lateral limita con los afloramientos expuestos en superficie de este basamento. La Figura 4 muestra las isopiezas y el sentido del flujo de agua subterránea en el Salar de Pedernales. Es importante destacar que las características químicas de las aguas subterráneas en esta cuenca responden al sentido de flujo dirección NW identificado en la piezometría y a un aumento de la mineralización desde la zona sur a norte, lo que evidencia una conexión hidráulica entre las diferentes subcuencas del área (Codelco, 2018).

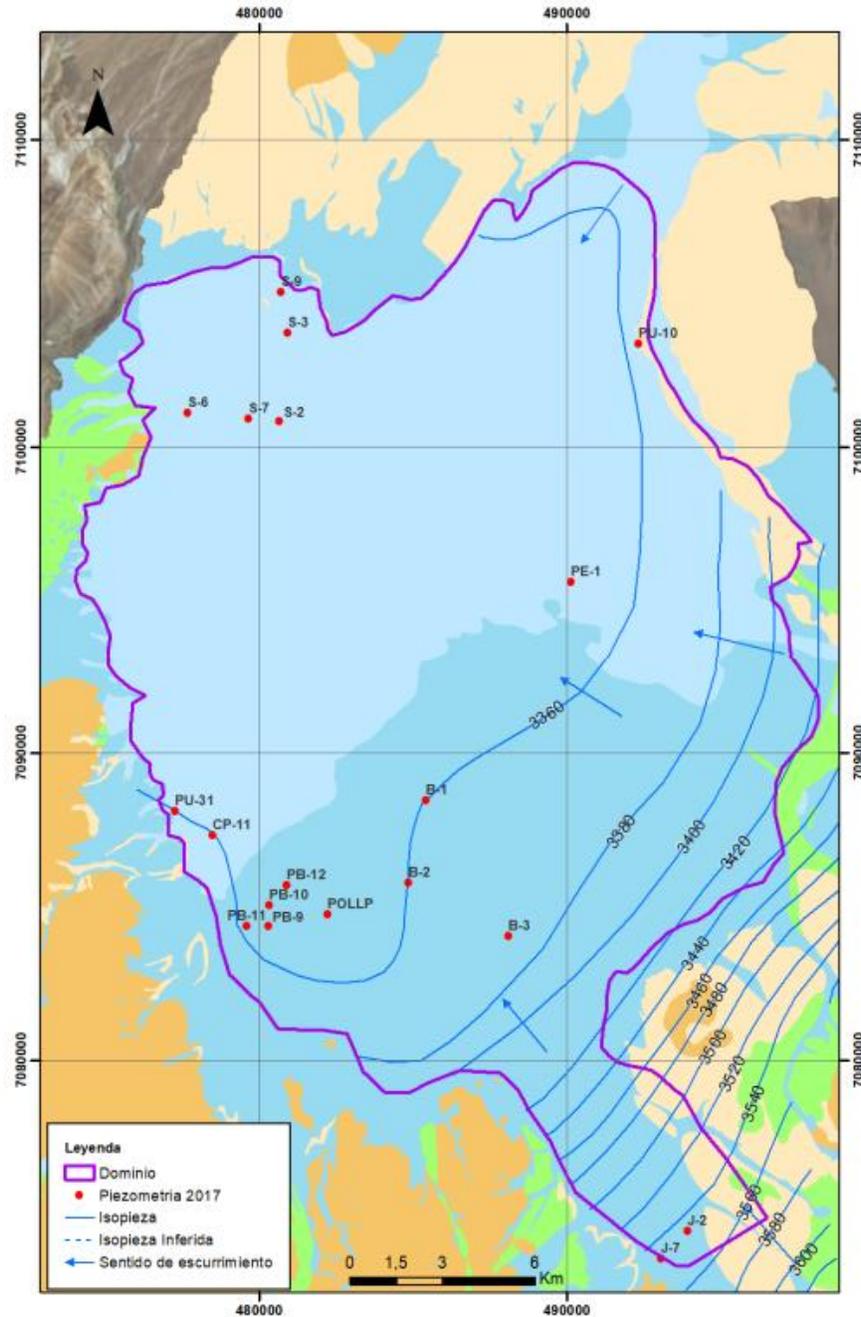


Figura 4. Mapa de isopiezas con el sentido de flujo del agua subterránea en el Salar de Pedernales (Amphos 21, 2018).

En términos generales las aguas de las zonas de recarga ubicadas el E del Área de Estudio, son menos mineralizadas ya que son las que han sufrido menos interacción con las rocas y son de tipo bicarbonatadas cálcicas. Siguiendo las líneas de flujo las aguas evolucionan hacia sulfatadas cálcico-sódicas y, finalmente, a aguas muy saladas con facies cloruras sódicas en el sector del salar.

## 2.5.6 Hidrología y Recursos hídricos

El área descrita para este componente representa una porción del Área de Estudio descrita al inicio de este informe. Específicamente corresponde a la cuenca del Salar de Pedernales, la cual abarca una superficie hidrográfica de 3.450 km<sup>2</sup> y, según Codelco (2018) se divide en tres subcuencas principales (Figura 5): la subcuenca Río Juncalito de ~700 km<sup>2</sup> en el extremo sureste; la subcuenca Río La Ola de ~1.325 km<sup>2</sup>, en el área suroeste, y las subcuencas Salar de Pedernales y Llano de la Vega Helada de ~1.425 km<sup>2</sup> en el sector norte. Las subcuencas Río Juncalito y Río La Ola aportan sus aguas, tanto superficiales como subterráneas, a la subcuenca Salar de Pedernales. El Salar de Pedernales, emplazado a una altura media de 3.370 m s.n.m es el más grande de la Región de Atacama y cubre una superficie de 335 km<sup>2</sup> con lagunas superficiales (Aguirre y Venegas, 2005).

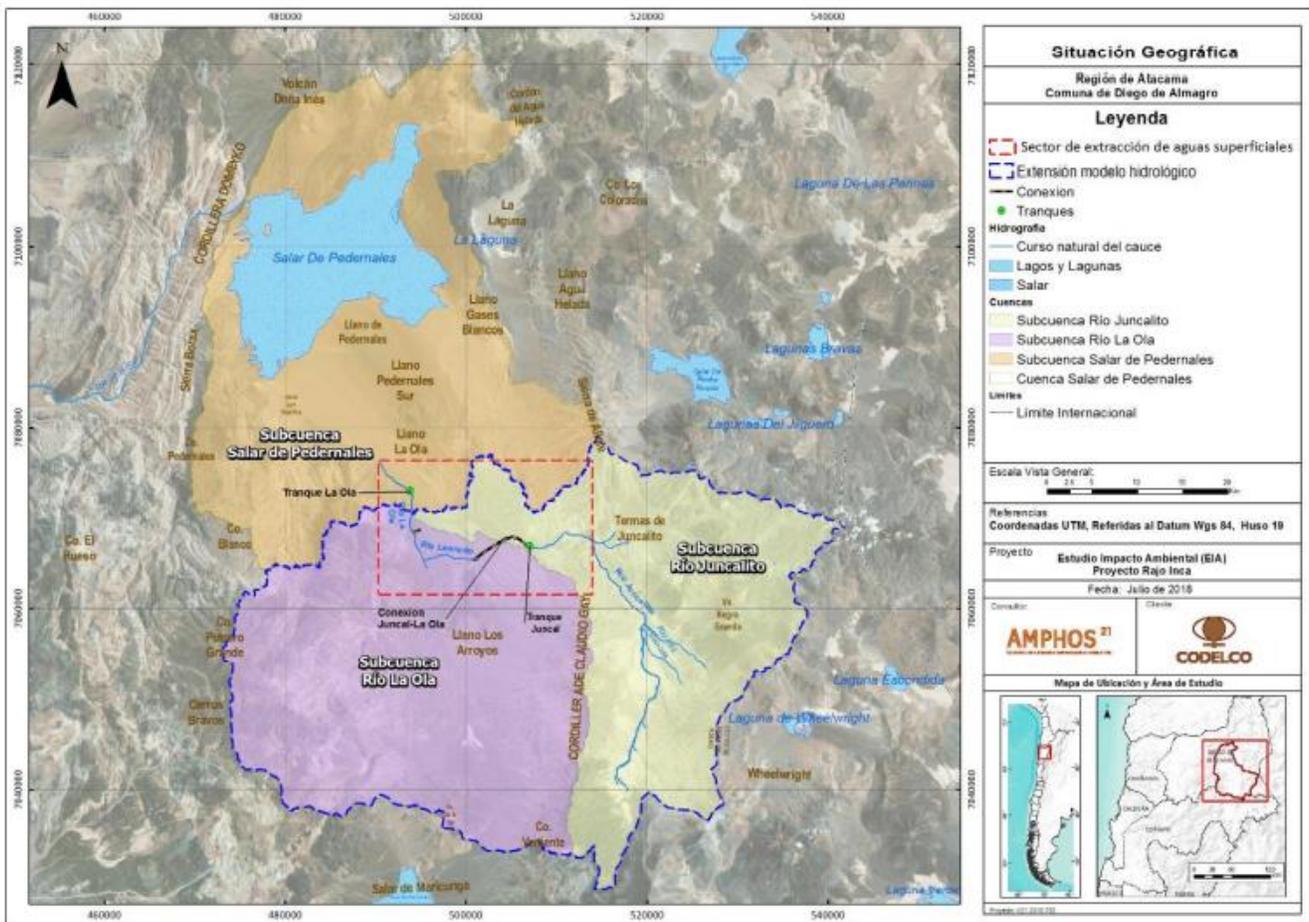


Figura 5. Subcuencas y red de drenaje de la cuenca Salar de Pedernales (Codelco, 2018).

El Salar de Pedernales, como otros salares de su tipo, registra la presencia de un SVAHT, que corresponde a una formación vegetacional que constituyen la base de un ecosistema singular y único, altamente dependiente de la disponibilidad hídrica superficial y/o subterránea, existente en el lugar.

La cuenca del Salar de Pedernales presenta tres ríos principales (8): el río Juncalito que nace en el área suroriente de la cuenca y que recibe aportes del río Negro; el río La Ola que nace en la zona de

descarga subterránea denominada Ojos de La Ola, ubicada a 9 kilómetros al sur del tranque La Ola; y el río Leoncito, el cual es tributario de La Ola y recibe gran parte de las aguas del Juncalito de forma artificial, mediante una conexión desde el tranque Juncal. Posteriormente este caudal fluye a través del río Leoncito hasta el río La Ola.

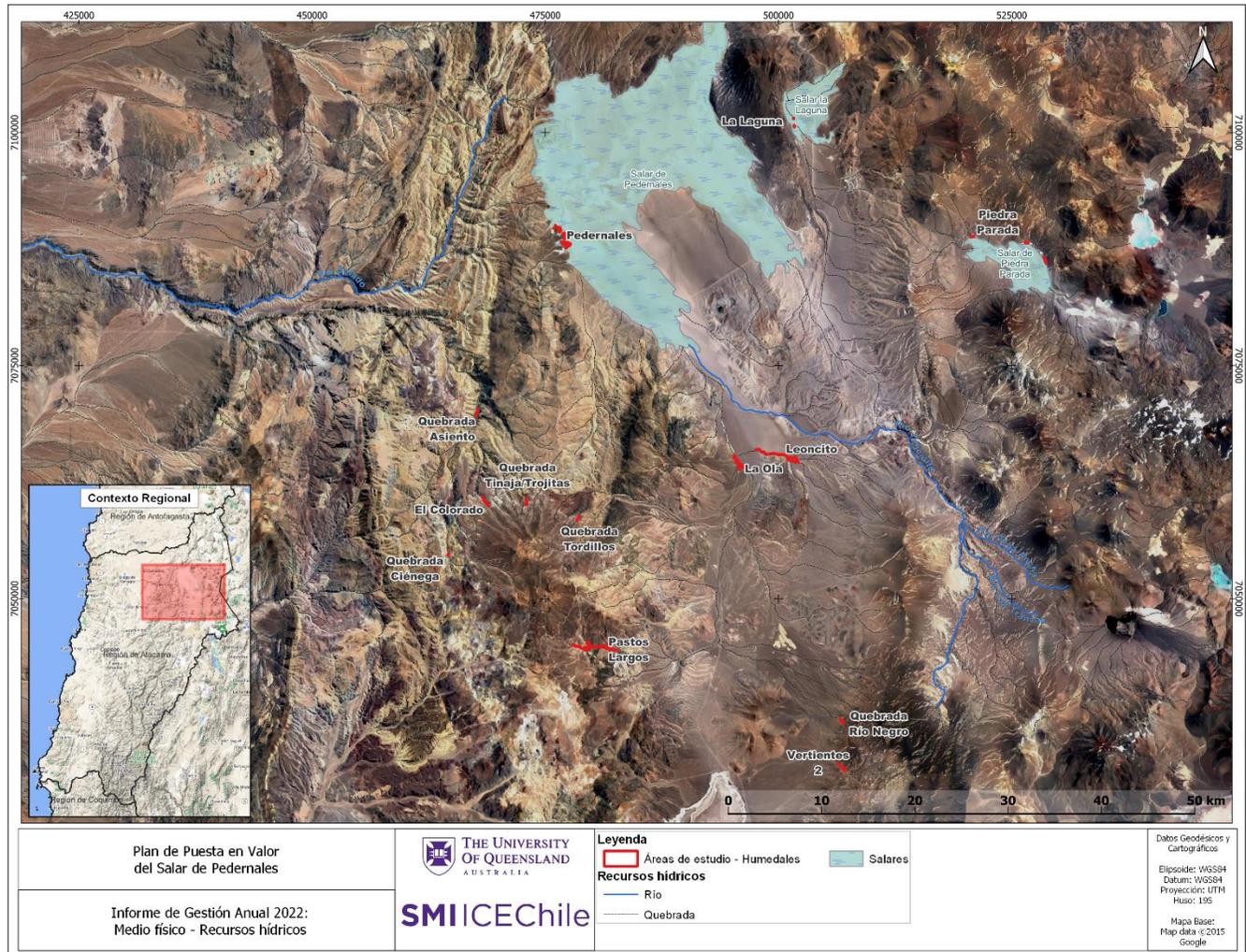


Figura 6. Mapa de recursos hídricos para el Área de Estudio. Imagen obtenida mediante QGIS.

En cuanto al balance hídrico (Figura 7), el sistema subterráneo de la subcuenca Salar de Pedernales se encuentra formado por un sistema acuífero que se comporta como un único sistema de carácter libre. Las entradas a dicho sistema son 4 y corresponden a recargas por precipitación (directa y por escorrentía), por conexión subterránea con cuencas laterales (La Laguna y Quebrada Los Maranceles), y entrada subterránea por el Llano La Ola. Estas entradas suman un total estimado en 1.044,9 l/s (valor probable). Por su parte, las salidas del sistema son las extracciones desde pozos, la descarga desde el Dren Agua Helada hacia el Río Salado y la evaporación directa, las cuales suman un total estimado en 1.083,3 l/s. Esta situación genera una variación negativa de almacenamiento de 38,2 l/s, la cual se refleja en un descenso de los niveles en el entorno del Campo de Pozos de Bombeo (Codelco, 2018).



Figura 7. Balance hídrico cuenca Salar de Pedernales. Fuente: elaboración propia.

### 2.5.7 Riesgos geológicos

Un peligro geológico es un evento o proceso natural (erupciones volcánicas, remociones en masa, inundaciones, terremotos, tsunamis), generado por la dinámica interna o superficial del planeta, que pueden ocasionar daño a la sociedad o al ambiente (SERNAGEOMIN, s.f.). Por su parte, los riesgos geológicos pueden ser entendidos como una circunstancia o situación de peligro, pérdida o daño, social y económico, debida a una condición geológica o a una posibilidad de ocurrencia de proceso geológico, inducido o no (Augusto-Filho *et al.*, 1990). En otras palabras, un riesgo geológico corresponde a la conjunción de un peligro geológico y la vulnerabilidad de la sociedad frente a ese peligro.

El peligro geológico entonces es la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno natural, mientras que el riesgo geológico es el peligro, pero involucrando la vulnerabilidad de afectación en base a este peligro geológico. Es de suma importancia conocer estos peligros geológicos en áreas donde hay una biodiversidad importante, sobre todo porque eventos como remociones en masa pueden modificar el relieve y la morfología del sector, afectando la disponibilidad de agua o el desarrollo del ecosistema en diferentes formas. Esto indudablemente tiene una consecuencia directa en la flora y fauna, las cuales aprovechan los recursos disponibles en la cuenca del Salar de Pedernales. Las comunidades también sufren consecuencias negativas por esto, e incluso son más vulnerables que el ecosistema porque muchas veces las comunidades no pueden recuperarse de estos daños asociados a peligros naturales.

Sin embargo, es necesario considerar factores menos influyentes, pero no menos importantes, que favorecen directa o indirectamente la inestabilidad de taludes como la acción antrópica. Actividades como la deforestación, cortes de laderas, creación de caminos, instalaciones mineras, entre otros, también pueden desencadenar eventos de remociones en masa o activación de quebradas (González de Vallejo *et al.*, 2002).

### 2.5.7.1 Remociones en masa

Una remoción en masa del tipo de flujo detrítico o aluvión es un movimiento descendente de un volumen de material constituido por roca, suelo o ambos en diversas proporciones, donde el material es agitado y saturado con agua y se mueve pendiente a bajo por efecto de la gravedad. Estas partículas sueltas junto a sedimentos no consolidados disponibles, en caso de eventos pluviométricos extremos, son transportadas y se dirigen hacia un cauce principal, donde continúan el movimiento hasta alcanzar el área de depósito que corresponde al sitio de salida de las quebradas hacia zonas más llanas, y es en este lugar se forman los llamados “abanicos aluviales” (Gobierno Regional de Atacama, 2012).

Existen dos categorías de causas para explicar los deslizamientos o remoción en masa: factores pasivos y factores activos. En los factores pasivos encontramos los condicionantes, entendidos como las circunstancias propias del lugar como pueden ser la geología, la ausencia de vegetación, la topografía, el grado de erosión, las pendientes, el grado de humedad y la concentración de los flujos de escorrentía de agua, entre otros. Los factores desencadenantes o activos están relacionados principalmente con las precipitaciones de gran intensidad y los movimientos sísmicos que inducen la remoción en masa, entre otros.

El Área de Estudio tiende a presentar riesgo potencial alto y medio, esto debido a la baja cobertura vegetal que existe en la zona y por el predominio del clima desértico normal. La aridez de la zona provoca acumulación de material sin cohesión; este material se deposita en las quebradas y cuando hay precipitaciones extraordinarias, sumado a otros factores desencadenantes, se pueden activar procesos de remoción en masa (Gobierno Regional de Atacama, 2012).

Las precipitaciones, como se mencionó en el subcapítulo “5.1 Clima y precipitaciones”, son en general escasas, pero aun así pueden tener un rol como un agente desencadenante de una remoción en masa. Esto principalmente en zonas que presentan una pendiente mayor a los 22° y que, frente a un evento atípico, reciben un aporte de precipitaciones importante, lo que sumado a otros factores, como la poca cobertura vegetal, aumentan la probabilidad de ocurrencia de estos fenómenos.

Como se mencionó previamente, hay otros factores menos influyentes que pueden generar remociones en masa. Henríquez (2019) indica que acciones antrópicas también tienen un rol como agente desencadenante de remociones en masa. En específico, el aumento de la pendiente de taludes, represamiento, deforestación o cambios en el tipo de vegetación, entre otras, son intervenciones artificiales que disminuyen la estabilidad de una ladera. De todos modos, según el grado de afectación de la intervención antrópica en el sector dependerá la magnitud del peligro de deslizamientos. La acción antrópica puede favorecer principalmente eventos como: caídas de roca, deslizamientos, toppling, y flujos (Varnes, 1978).

En la Figura 8 se observan las diferentes pendientes de la cuenca del Salar de Pedernales, las cuales están en un rango cada cinco grados (5°), siendo el menor ángulo de pendiente < a 5° y el mayor de 90°. Al observar la figura es posible identificar como el área del Salar de Pedernales, Leoncito, La Laguna, Piedra Parada y La Ola presentan una baja pendiente, y que corresponde a zonas planas donde no superan los 5° de pendiente (color azul en la Figura 8). Por otra parte, en el área donde se encuentran los sectores Quebrada Asiento, Quebrada Tinaja/Trojitas, El Colorado, Quebrada Ciénega, Quebrada Tordillos y Pastos Largos presentan una importante variación de pendientes, donde si bien, hay zonas relativamente planas con pendientes menores a 5° (color azul), de manera general se

observan pendientes entre 10 y 25° (colores amarillo y verde), incluso alcanzando pendientes de hasta 45° o más (colores café y rojo) en Quebrada Asiento. Finalmente, al sur de la cuenca de Salar de Pedernales, los sectores Vertientes y Quebrada Río Negro presentan pendientes que no superan el rango de los 25°. En base a esto, los sectores donde hay mayor probabilidad de que se desencadenen eventos de remociones en masa debido a las altas pendientes es en la zona W de la cuenca de Salar de Pedernales, específicamente en Quebrada Asiento, El Colorado y Quebrada Ciénega.

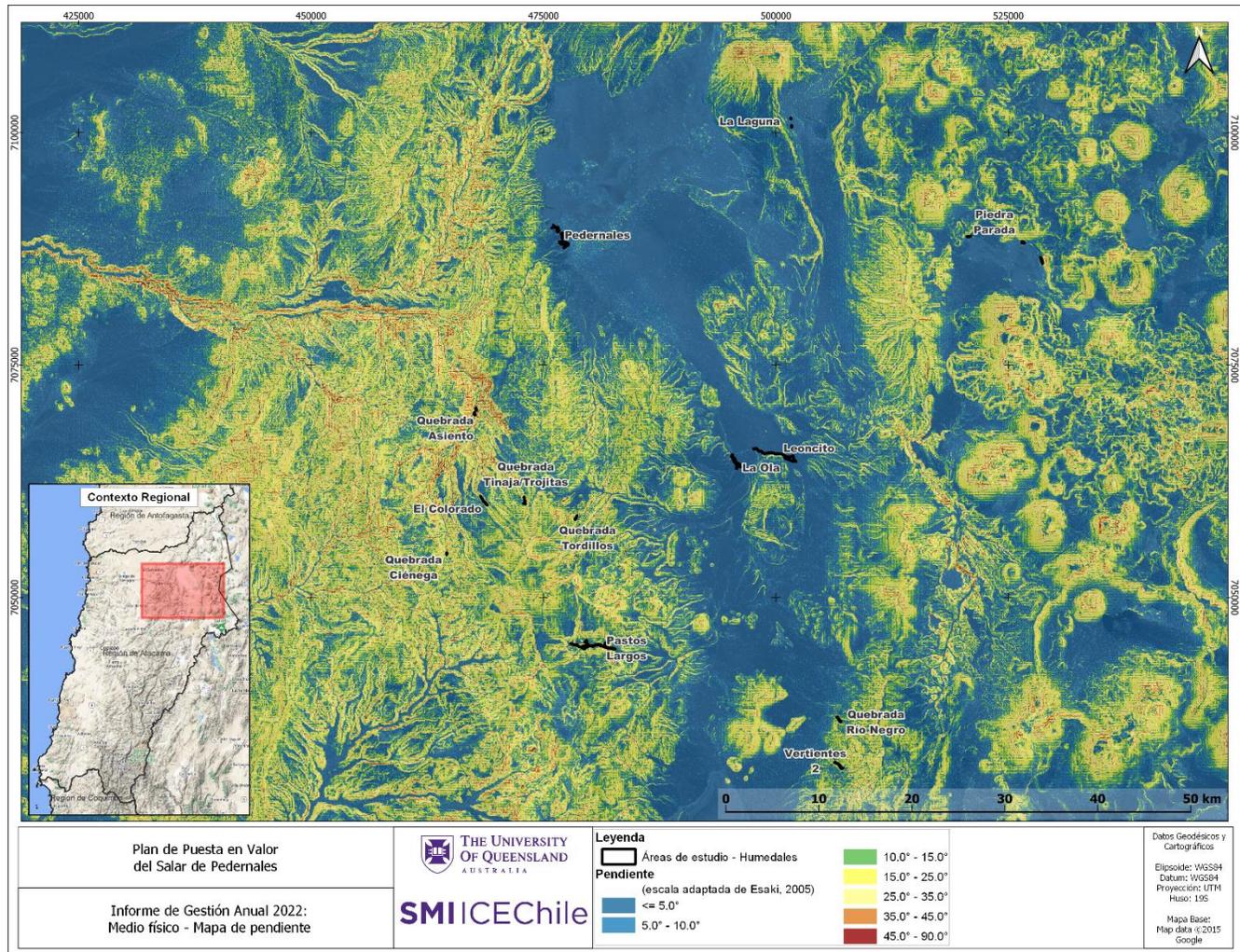


Figura 8. Mapa de pendientes para el sector de la cuenca Salar de Pedernales. Imagen obtenida mediante QGIS.

### 2.5.7.2 Activación de quebradas

La Figura 9 muestra la distribución de quebradas dentro del área abarcada por el Proyecto Rajo Inca. En ella se ve que existen numerosas quebradas menores, sin embargo, hay una quebrada que atraviesa el sistema de conducción de agua que viene de Pedernales y que tiene dimensiones mayores. En el sector del Salar de Pedernales, se observan dos quebradas mayores que desembocan en el mismo salar.

Dentro del área también destacan quebradas que, al ser sometidas a un aporte pluvial mayor, tienen riesgo de activación. Una de ellas se encuentra en el sector del depósito de Empréstito N°1, otra se sitúa en la quebrada Las Salinas, esta atraviesa el sector del sistema de conducción de relaves; siguiendo al oriente y antes de El Salvador se encuentran 7 pequeñas quebradas con vestigios de concentración de flujos pluviales.

Finalmente existen dos quebradas que bajan desde el depósito de minerales de baja ley y otra que baja desde el botadero sureste, ambas en el sector mina; esta última quebrada ya se encuentra intervenida (Codelco, 2018).

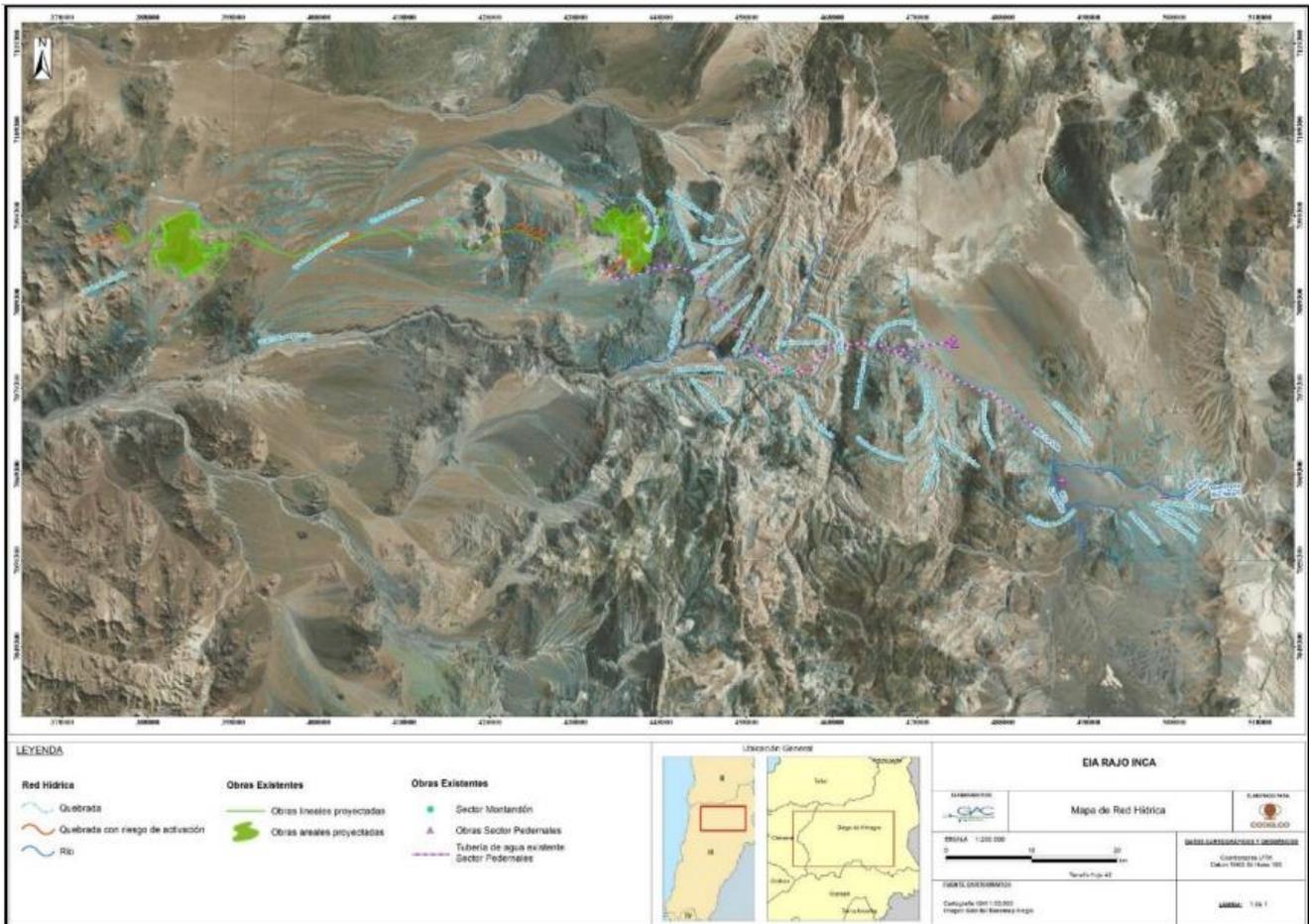


Figura 9. Mapa de quebradas identificadas en el área abarcada por el Proyecto Rajo Inca. El recuadro negro enmarca el área descrita en este punto (Codelco, 2018).

### 2.5.7.3 Sismicidad

Chile está ubicado en el Cinturón de Fuego del Pacífico, siendo una de las zonas más sísmicas del planeta. Bajo su territorio convergen la placa de Nazca y la placa Sudamericana, provocando periódicamente movimientos telúricos de diversa magnitud. En relación con potenciales eventos sísmicos, en la región de Atacama históricamente se han producido terremotos de grandes magnitudes

a intervalos más o menos regulares, muchos de estos movimientos han tenido lugar en zonas cercanas a la costa, frente a la zona de ruptura, y algunos de ellos han generado tsunamis.

El último evento de gran magnitud y destrucción en la región de Atacama se produjo en noviembre de 1922, y es por esto que se estima que el lugar de desplazamiento del sismo de 1922 representa una brecha sísmica actual (Gobierno Regional de Atacama, 2012).

Es importante destacar que el sector en donde se emplaza el Área de Estudio general está a grandes alturas sobre el nivel del mar por lo que no hay riesgo de ser afectados por un tsunami. De todas maneras, un sismo puede afectar construcciones e instalaciones ubicadas en el sector o en comunidades aledañas. Por otra parte, los eventos sísmicos pueden reactivar fallas geológicas desplazando material rocoso por quebradas con altas pendientes, generando remociones en masa, caídas de roca o deslizamientos. En la Tabla 1, se muestran los principales eventos sísmicos en la Región de Atacama.

*Tabla 1. Sismos con magnitud considerable, que han afectado a la Región de Atacama. Fuente. Elaboración Propia con información extraída de EIA (2018), Gobierno Regional de Atacama (2012).*

<b>Año</b>	<b>Día/Mes</b>	<b>Ciudades Afectadas</b>	<b>Magnitud [Ms]</b>	<b>Efecto Secundario</b>	<b>Grado de Tsunami</b>
1796	30-mar	Copiapó, Huasco, Coquimbo	7.7	-	-
1819	3,4,11- abril	Copiapó, Caldera-Constitución	8.3	Tsunami	3
1822	05-nov	Copiapó	8.5	-	-
1859	05-oct	Región de Atacama, Caldera	7.6	Tsunami	2
1877	09-may	Arica - Copiapó	8.5	Tsunami	3
1909	07-jun	Copiapó	7.6	-	-
1918	04-dic	Copiapó y alrededores	8.2	Tsunami, Remoción en Masa	2
1922	10-nov	Vallenar a Coquimbo, Antofagasta -Chañaral	8.4	Tsunami, Licuefacción	3
1946	02-ago	Copiapó	7.9	-	-
1983	04-oct	Copiapó - Chañaral	7.3	-	-

Fuente: Elaboración propia, 2022.

#### 2.5.7.4 Vulcanismo

En la Región de Atacama existen siete volcanes, de los cuales estos cinco se consideran relativamente cercanos a la zona estudiada: Cordón del Azufre, Cerro Bayo, Sierra Nevada, Nevado Incahuasi, Nevado Tres Cruces y Ojos del Salado. Existe muy poca información respecto a los procesos eruptivos de estos volcanes y según la Red Nacional de Vigilancia Volcánica de SERNAGEOMIN, ninguno de ellos (ni de la región) se encuentra activo.

## 2.6 Conclusiones

Geomorfológicamente el Área de Estudio, que comprende cinco cuencas, se encuentra emplazada en la gran fosa de los salares prealtiplánicos, entre la Cordillera de Domeyko y la Cordillera Claudio Gay, y que está limitada por el Salar de Atacama al norte y el Salar de Maricunga en el sur. Las rocas que predominan, principalmente en la cuenca del Salar de Pedernales la cual abarca la mayor cantidad de sitios en estudio y posee la mayor superficie de las cuencas alto-andinas de la Región de Atacama, son de origen continental y marino, con presencia de rocas volcánicas tales como andesitas y basaltos; rocas sedimentarias como calizas, areniscas calcáreas y calcilitas con presencia de fauna fósil; y rocas intrusivas tales como granitos, dioritas, granodioritas y monzogranitos. El principal control estructural que existe en esta cuenca corresponde al segmento sur del Sistema de Fallas de Domeyko. Destaca que, de los depósitos sedimentarios existentes en la zona de estudio, hay tres que albergan acuíferos de alta importancia hidrogeológica, estos son: depósitos fluviales del Cuaternario, depósitos aluviales del Mioceno Superior y Plioceno, y depósitos aluviales del Plioceno y Cuaternario. Litológicamente estos depósitos sedimentarios están conformados principalmente por rocas tamaño grava y arena en matriz de limo y/o arena fina.

Los suelos del Área de Estudio asociados directamente a los Sistemas Vegetacionales Azonales Hídricos Terrestres (SVATH), se consideran como suelos orgánicos hidromórficos recientes. Estos se ubican en cuencas exorreicas y endorreicas, que generan condiciones sitio específicas para su desarrollo, destacando como las más relevantes: un drenaje restringido y en algunos casos, impedido; un alto contenido de materia orgánica en distintas fases de descomposición asociada a una vegetación específica; niveles freáticos elevados que pueden alcanzar la superficie y acumulaciones salinas que pueden llegar a ser muy elevadas. La presencia de estos acuíferos, sumado a los flujos de agua superficiales existentes en la cuenca del Salar de Pedernales, tienen un rol fundamental en la conservación y desarrollo normal de los SVATH, el cual corresponde a un ecosistema único y altamente dependiente de la disponibilidad de agua. La constante explotación de estos acuíferos tiene como consecuencia un descenso en los niveles piezométricos, donde el balance hídrico de la cuenca del Salar de Pedernales demuestra que las recargas o entradas de agua a los acuíferos son menores que las salidas de agua. Esto ha inducido la búsqueda de alternativas que ayuden a disminuir el impacto por el bombeo de agua.

Considerando las características geológicas y geomorfológicas de la zona, se tiene que los principales riesgos geológicos asociados a la cuenca del Salar de Pedernales son: sismicidad y remociones en masa. Este último puede ser desencadenado por el primero, además, está asociado a los cambios constantes de pendiente en la zona cordillerana sumado al déficit de vegetación (por el clima árido y baja tasa de precipitaciones) que sea capaz de sostener el material rocoso y detrítico, lo que aumenta

la probabilidad de desprendimientos, deslizamientos y, en caso de tener eventos anómalos de precipitaciones, aluviones.

Finalmente, es importante mencionar que existe una brecha de información en la cuenca del Salar de Pedernales y es por esto que el medio físico y sus diferentes componentes han sido descritos según las zonas donde hay información disponible. Lo mismo con respecto a los diferentes procesos y eventos geológicos que dieron origen a los salares ubicados en la cuenca, al igual que las causas por las cuales cada salar presenta depósitos minerales con composiciones diferentes (borax, litio, sodio, potasio, calcio, entre otros).

## 2.7 Referencias

- Aguirre, I. y Venegas, M. (2005). Hidrogeología de la Cuenca Salar de Pedernales, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Hidrogeología, N°3, 1 mapa en 2 hojas, escala 1:100.000. Santiago, Chile.
- Ahumada, M. y Faúndez, L. (2009). Guía Descriptiva de los Sistemas Vegetacionales Azonales Hídricos Terrestres de la Ecorregión Altiplánica (SVAHT). Ministerio de Agricultura de Chile, Servicio Agrícola y Ganadero. Santiago, Chile. 118 p.
- Amilibia, A. y Skarmeta, J. (2003). La inversión tectónica en la Cordillera de Domeyko en el norte de Chile y su relación con la intrusión de sistemas porfíricos de Cu-Mo. In Congreso Geológico Chileno, No. 10, Actas, Sesión Temática 2: 1-7.
- Amphos 21. (2014). Estudio Hidrogeológico Cuenca Salar de Pedernales y Zona de aducciones de Agua Dulce. Informe N°9 Modelo Conceptual Hidrogeológico de la Zona de Aducciones de Agua Dulce. 178 pp.
- Amphos 21. (2016). Diagnóstico de disponibilidad hídrica en cuencas Alto-Anginas de la Región de Atacama, Fase 3. Informe final. S.I.T N° 398
- Amphos 21. (2018). Anexo 4-6-C: Modelo hidrogeológico numérico de la subcuenca Salar de Pedernales. Evaluación de Impacto Ambiental Proyecto Rajo Inca. 87 pp.
- Augusto Filho, O., CERRI, L. D. S., & Amenomori, C. J. (1990). Riscos geológicos: aspectos conceituais. Simpósio Latino-Americano Sobre Risco Geológico Urbano, 1, 334-341.
- Biblioteca del Congreso Nacional (BCN). (s.f.). Mapoteca: Mapas vectoriales. BCN, Información territorial. Recuperado el 27 de abril de 2022. [https://www.bcn.cl/siit/mapas\\_vectoriales/index\\_html](https://www.bcn.cl/siit/mapas_vectoriales/index_html).
- Börgel, R. (1983). Geomorfología. Santiago: Instituto Geográfico Militar. Santiago, Chile. 182 pp.
- Codelco. (2018). Estudio de impacto ambiental. Capítulo 3: Línea de base (sección A) Medio Físico. Recuperado el 06 de mayo de 2022. <https://seia.sea.gob.cl/busqueda/buscarProyectoAction.php?nombre=rajo%20inca>
- Dirección General de Aguas (DGA). (2017). Cuencas Altiplánicas 2010: Capa de información vectorial en formato Shape de las cuencas altiplánicas del país. SNIT, IDE Chile, Geoportal de Chile: Catálogo Nacional de Información Geoespacial. Recuperado el 12 de abril de 2022: <http://www.geoportal.cl/geoportal/catalog/search/resource/resumen.page?uuid=%7BC1E03294-5B44-4883-8BD3-F132C41633F5%7D>
- Dirección General de Aguas (DGA). (2015). Diagnóstico de disponibilidad hídrica en cuencas Alto - Andinas de la Región de Atacama, Fase 2. Resumen ejecutivo. S.I.T. N°380. 37 pp.
- Gobierno Regional de Atacama. (2012). Diagnóstico amenazas naturales y exposición sistemas estratégicos. Informe final. Plan regional de ordenamiento territorial, región de Atacama. 255 pp. [https://goreatacama.gob.cl/wp-content/uploads/2019\\_03\\_28\\_5.\\_Sistema\\_Riesgos\\_Naturales.pdf](https://goreatacama.gob.cl/wp-content/uploads/2019_03_28_5._Sistema_Riesgos_Naturales.pdf)
- González de Vallejo, L.I., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C. (2002). Ingeniería Geológica. Editorial Prentice Hall.

- Henríquez, E. (2019). Análisis de susceptibilidad a remociones en masa en la comuna de Corral, al norte de los 39° 54´ S, región de los Ríos, Chile. Köeppen, W. (1948). Climatología, con un estudio de los climas de la tierra (Versión en español). Fondo de cultura económica. Buenos Aires. 478 pp.
- Luchinger, P. (2013). Simulación hidrogeológica para la explotación del acuífero ubicado en la quebrada Potrero Grande, región de Atacama [Memoria de Título profesional de Geólogo, Universidad de Chile]. 105 pp. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/116267>.
- Luzio, W. (2010). Suelos de Chile. Departamento de Ingeniería y Suelos. Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile. Santiago de Chile. 366 pp.
- Pérez, E. (1982). Bioestratigrafía del Jurásico de Quebrada Asientos, Norte de Potrerillos, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín, N°. 37, 149 pp.
- Red Nacional de Vigilancia Volcánica (RNVV). (s.f.). Servicio Nacional de Geología y Minería. Recuperado el 27 de abril de 2022. <https://rnvv.sernageomin.cl/>.
- Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). (s.f.). Peligros geológicos. Recuperado el 27 de abril de 2022. <https://www.sernageomin.cl/feria-peligros/#>.
- Tomlinson, A., Cornejo, P. y Apódosis, C. (1999). Hoja Potrerillos, Región de Atacama. Escala 1:100.000. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). Carta Geológica N°14.
- United States Geological Survey (USGS). (s.f.). *EarthExplorer*. USGS, U.S. Department of the Interior. Recuperado el 27 de abril de 2022. <https://earthexplorer.usgs.gov/>.
- Varnes, D. (1978). Slope movement types and processes. (R. Schuster, & R. Krizek, Edits.) Washington D.C.: Transportation and Road research board, National Academy of Science.

