



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



# CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y GEOTÉCNICA PARA EL DEPÓSITO DE RELAVES EN EL ÁREA HIJUELA 10, PROVINCIA DE HUASCO, REGIÓN DE ATACAMA, CHILE

Memoria para optar al Título de Geólogo

**Claudia Teresa Oñate Concha**

**Profesor Patrocinante:** MSc. Abraham Elías González Martínez

**Profesional Guía:** Sr. Matías Felipe Oyarzo Agurto

**Profesores Comisión:** Dr. Luis Arturo Quinzio Sinn  
Sr. Ramiro Ulises Bonilla Parra

CONCEPCIÓN, 2020



# ÍNDICE

Página

<b>RESUMEN</b> .....	
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>1.1. FORMULACIÓN DEL ESTUDIO</b> .....	1
1.1.1. Exposición del problema .....	1
1.1.2. Motivación .....	1
<b>1.2. OBJETIVOS</b> .....	2
1.2.1. Objetivo general .....	2
1.2.2. Objetivos específicos .....	2
<b>1.3. UBICACIÓN Y ACCESOS</b> .....	2
<b>1.4. METODOLOGÍA DE TRABAJO</b> .....	4
<b>1.5. CLIMA, FLORA Y FAUNA</b> .....	5
<b>1.6. AGRADECIMIENTOS</b> .....	8
<b>2. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL</b> .....	9
<b>2.1. ROCAS ESTRATIFICADAS</b> .....	9
<b>2.1.1. Jurásico Superior-Cretácico Inferior</b> .....	9
2.1.1.1. Formación Punta del Cobre .....	9
<b>2.1.2. Mioceno-Plioceno</b> .....	9
2.1.2.1. Gravas de Atacama .....	9
2.1.2.2. Gravas del Río Huasco .....	10
2.1.2.3. Depósitos Aluviales y Coluviales Antiguos .....	11
<b>2.1.3. Pleistoceno-Holoceno</b> .....	11
2.1.3.1. Depósitos Aluviales Inactivos .....	11
2.1.3.2. Depósitos Aluviales Activos .....	11
2.1.3.3. Depósitos Fluviales Activos .....	11
<b>2.2. ROCAS ÍGNEAS</b> .....	12
<b>2.2.1. Cretácico Inferior</b> .....	12
2.2.1.1. Complejo Plutónico La Higuera .....	12
<b>2.3. ESTRUCTURAS</b> .....	13
<b>3. GEOMORFOLOGÍA</b> .....	15
<b>3.1. FISIOGRAFÍA</b> .....	15
<b>3.2. HIDROGEOLOGÍA</b> .....	16
<b>4. GEOLOGÍA LOCAL</b> .....	19
<b>4.1. DEPÓSITOS NO CONSOLIDADOS</b> .....	19
4.1.1. Gravas de Atacama .....	19
4.1.2. Depósitos Aluviales y Coluviales Antiguos .....	20
4.1.3. Depósitos Aluviales Activos .....	21
<b>4.2. CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DE LOS SEDIMENTOS</b> .....	21
<b>4.3. ESTRUCTURAS</b> .....	24
<b>5. DEPÓSITOS DE RELAVES</b> .....	25

<b>5.1. GENERALIDADES .....</b>	<b>25</b>
<b>5.2. RIESGOS AMBIENTALES.....</b>	<b>26</b>
5.2.1. Contaminación de aguas.....	27
5.2.2. Contaminación atmosférica.....	28
5.2.3. Contaminación de suelos.....	28
<b>5.3. FALLAS ESTRUCTURALES Y GEOTECNIA .....</b>	<b>29</b>
<b>5.4. IMPACTO SOCIOAMBIENTAL .....</b>	<b>30</b>
<b>6. PELIGROS GEOLÓGICOS .....</b>	<b>35</b>
<b>6.1. CONCEPTOS BÁSICOS.....</b>	<b>35</b>
<b>6.2. PELIGRO SÍSMICO .....</b>	<b>35</b>
6.2.1. Estimación del riesgo sísmico.....	37
<b>6.3. REMOCIONES EN MASA .....</b>	<b>37</b>
<b>6.3.1. Factores condicionantes.....</b>	<b>39</b>
6.3.1.1. Geología y geotecnia.....	39
6.3.1.2. Geomorfología.....	40
6.3.1.3. Hidrología e hidrogeología.....	40
6.3.1.4. Vegetación.....	40
6.3.1.5. Clima.....	41
6.3.1.6. Actividad antrópica.....	41
<b>6.3.2. Agentes desencadenantes.....</b>	<b>41</b>
6.3.2.1. Sismos.....	42
6.3.2.2. Precipitaciones.....	42
<b>7. EVALUACIÓN DE AMENAZA POR REMOCIONES EN MASA... ..</b>	<b>43</b>
<b>7.1. PROCESOS GEOLÓGICOS Y PROBLEMAS GEOTÉCNICOS.....</b>	<b>43</b>
<b>7.2. SUSCEPTIBILIDAD A REMOCIONES EN MASA .....</b>	<b>45</b>
7.2.1. Inventario.....	46
7.2.2. Análisis de factores condicionantes.....	48
7.2.2.1. Flujos.....	51
<b>8. RESULTADOS .....</b>	<b>55</b>
<b>9. CONCLUSIONES .....</b>	<b>60</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>62</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>62</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
1	Mapa de ubicación del área de estudio y acceso al sitio Hijuela 10.....	3
2	Imagen satelital del área de estudio.....	4
3	Geología del área de estudio.....	12
4	Llanura en el área de Hijuela 10 con líneas de drenaje incipientes.....	16
5	Mapa de sombras de la subcuenca Río Huasco.....	17

6	Montículos dentro de Hijuela 10 donde se presentan las Gravas de Atacama .....	19
7	Secciones de los Depósitos Aluviales y Coluviales Antiguos.....	20
8	Quebrada Pingueritas con relleno de material fino inserta en llanura aluvial .....	21
9	Modelo de cuenca visual de Vallenar .....	34
10	Modelo de pendientes del área de estudio .....	50
11	Hoya hidrográfica Quebrada Pingueritas.....	51
12	Unidades de canal de drenaje en la cabecera de la hoya hidrográfica Quebrada Pingueritas.....	52
13	Mapa de susceptibilidad a flujos en la cabecera de la hoya hidrográfica Quebrada Pingueritas.....	53
14	Zonificación de amenazas enfocada en áreas de propagación de remociones en masa del tipo flujo .....	57

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>		<b>Página</b>
1	Promedio de temperatura y precipitaciones mensuales .....	6
2	Resumen de los parámetros texturales de las unidades reconocidas en Hijuela 10.....	22
3	Criterios para estimar cualitativamente la plasticidad de un material (SERNAGEOMIN, 2007).....	23
4	Ley media anual de cobre en plantas concentradoras .....	26
5	Tipos de depósitos de relaves según forma de almacenamiento.....	30
6	Principales eventos sísmicos históricos, magnitud $M_w > 6,0$ .....	36
7	Clasificación de remociones en masa según Varnes (1978).....	38
8	Tipos de análisis para la zonificación de la susceptibilidad a movimientos en masa.....	45
9	Catastro de remociones en masa y principales eventos hidrometeorológicos que han afectado a la Región de Atacama entre 1900 y el presente .....	47
10	Despliegue de factores condicionantes (general) para la estimación del grado de susceptibilidad de remociones en masa según Lara (2007) .....	49
11	Ponderaciones de cada unidad de canal de drenaje definida en el área de estudio .....	53

## RESUMEN

En el presente trabajo se realiza una caracterización geológica y geotécnica del área Hijuela 10, perteneciente a la Empresa Nacional de Minería (ENAMI), con el objetivo de estudiar y determinar la factibilidad de instalar depósitos de relaves.

El sitio mencionado se encuentra en la comuna de Vallenar, junto a una planta de beneficios de cobre de la misma empresa y a 2,5 kilómetros de la zona urbana.

La metodología utilizada para cumplir el objetivo incluye la recopilación, revisión y validación de la información geológica y geomorfológica existente. También contempla la fotointerpretación de imágenes satelitales disponibles del área mediante *softwares* SIG y el análisis de riesgos asociados a los peligros geológicos reconocidos en el sitio de ENAMI.

Para la caracterización geotécnica de los materiales geológicos que constituyen el terreno, se utilizó la información proporcionada por un reconocimiento visual *in situ* efectuado por parte de geólogos de la empresa GMECH (Servicios Geofísicos y Geológicos). De acuerdo a estos datos litológicos texturales se puede hacer una aproximación cualitativa de la resistencia del futuro suelo de fundación y se estiman aceptables características y comportamiento geotécnico adecuado.

Para el análisis y evaluación de susceptibilidad a remociones en masa se ha escogido un método cualitativo de ponderación de factores utilizado en numerosos trabajos enfocados en esta temática. El detalle y desglose de cada factor es modificado para adaptarlo al tipo de terreno que se está analizando, descartando y agregando algunos subfactores.

Mediante la aplicación de este método y la revisión de las condiciones geológicas y geomorfológicas en el área de estudio, se determina que el sitio Hijuela 10 en sí mismo presenta muy baja a nula susceptibilidad a remociones en masa. A pesar de ello, puede constituir un área de propagación de remociones del tipo flujos de barro y/o detritos (“aluviones”), al considerar la trayectoria lógica a través de quebradas que provienen de sectores que muestran mayor susceptibilidad a estos procesos.

Con la información proporcionada por este estudio se espera contribuir al proyecto y a la fase de diseño en particular, donde se requiere evaluar la ubicación definitiva del o los depósitos de relaves y las alternativas tecnológicas a emplear.

# **1. INTRODUCCIÓN**

## **1.1. FORMULACIÓN DEL ESTUDIO**

### **1.1.1. Exposición del problema**

Los residuos derivados de la fase industrial de procesos mineros pueden llegar a tener un fuerte impacto en la sociedad y el entorno natural. Por esta razón, se debe examinar rigurosamente cada una de las etapas del proyecto para asegurar que los relaves sean depositados de forma segura y ambientalmente responsable.

### **1.1.2. Motivación**

La instalación de nuevos depósitos de relaves es un tema que concierne tanto a la comunidad como a las plantas de beneficio mineral, que deben cumplir ciertos requisitos ambientales y de seguridad. En dicha labor, cobra relevancia la regulación en torno a la aprobación de las fases de diseño, construcción, operación y cierre de depósitos de relaves. Su fin es garantizar el carácter obligatorio de estas buenas prácticas.

En virtud de lo señalado, la revisión de la composición y los procesos geológicos presentes en las zonas elegidas para el emplazamiento de estos contenedores se vuelve un trabajo necesario y base de partida para las siguientes etapas de un proyecto.

En la actualidad, la práctica del vertimiento de residuos mineros en cualquier lugar y con cualquier método está evidentemente fuera de toda cuestión. Siendo la seguridad y conciencia ambiental actitudes deseables y requeridas, por las cuales se han desarrollado normativas reguladoras y, consecuentemente, los estudios de caracterización geológica y geotécnica son fundamentales.

Considerando que la Planta Vallenar (ENAMI) solicitó el servicio denominado: “Estudio de caracterización de sitio para evaluar las alternativas tecnológicas y emplazamiento de depósitos de relaves en el área Hijuela 10”; se ha decidido estudiar, con el mayor detalle posible, las características del terreno escogido para describir sus propiedades geotécnicas y conocer los potenciales peligros geológicos a los que se expone la obra proyectada.

El presente trabajo forma parte del servicio solicitado, pero también nace del interés por comprender los factores que provocan desastres ambientales asociados a depósitos de relaves en la industria minera.

Los datos de campo utilizados, tales como detalles geológicos, geomorfológicos y geotécnicos, así como la autorización del tema de Memoria de Título, fueron concedidos por GMECH.

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. Objetivo general**

- Determinar la factibilidad de la instalación de depósitos de relaves de acuerdo a las características geológicas y geotécnicas del sitio escogido para su emplazamiento.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Describir aspectos geomorfológicos del área de estudio.
- Caracterizar litológicamente el terreno donde se pretende instalar los depósitos de relaves.
- Describir condiciones y propiedades geotécnicas.
- Identificar los peligros geológicos locales a los que se expone la obra proyectada.
- Evaluar la susceptibilidad de remociones en masa e identificar zonas de propagación en el área de estudio.
- Estimar la influencia que tiene la ocurrencia de peligros geológicos sobre la estabilidad y seguridad de los depósitos de relaves.
- Elaborar una zonificación geotécnica para el sitio Hijuela 10.

## **1.3. UBICACIÓN Y ACCESOS**

Hijuela 10 es un terreno propiedad de la Empresa Nacional de Minería (ENAMI) de 266 ha, situado junto a la planta de beneficios Vallenar de la misma empresa y donde se proyecta el emplazamiento de depósitos de relaves. Se localiza a solo 2,5 kilómetros al noreste de Vallenar, 541 km al norte de Santiago y 942 km al nornoreste de Concepción (Figura 1).

El área de estudio, entre los 324.986,9-339.806,5 m E y 6.835.940,15-6.844.602,80 m S (coordenadas UTM), es un cuadrángulo que contiene el terreno de ENAMI y su área de influencia.

Desde Vallenar el acceso a Hijuela 10 se realiza a través de la Ruta 5 con dirección hacia el norte. Después, se continúa por la ruta regional C-569 hasta los terrenos de ENAMI.





Figura 1: Mapa de ubicación del área de estudio y acceso al sitio Hijuela 10.

La delimitación del área de estudio (Figura 2) y la escala de trabajo están definidas de acuerdo al nivel de detalle que se requiere para obtener la información necesaria en la identificación de los peligros geológicos a los que se expone el proyecto y, a la vez, que permita considerar los potenciales impactos que tiene este en los elementos socioambientales.

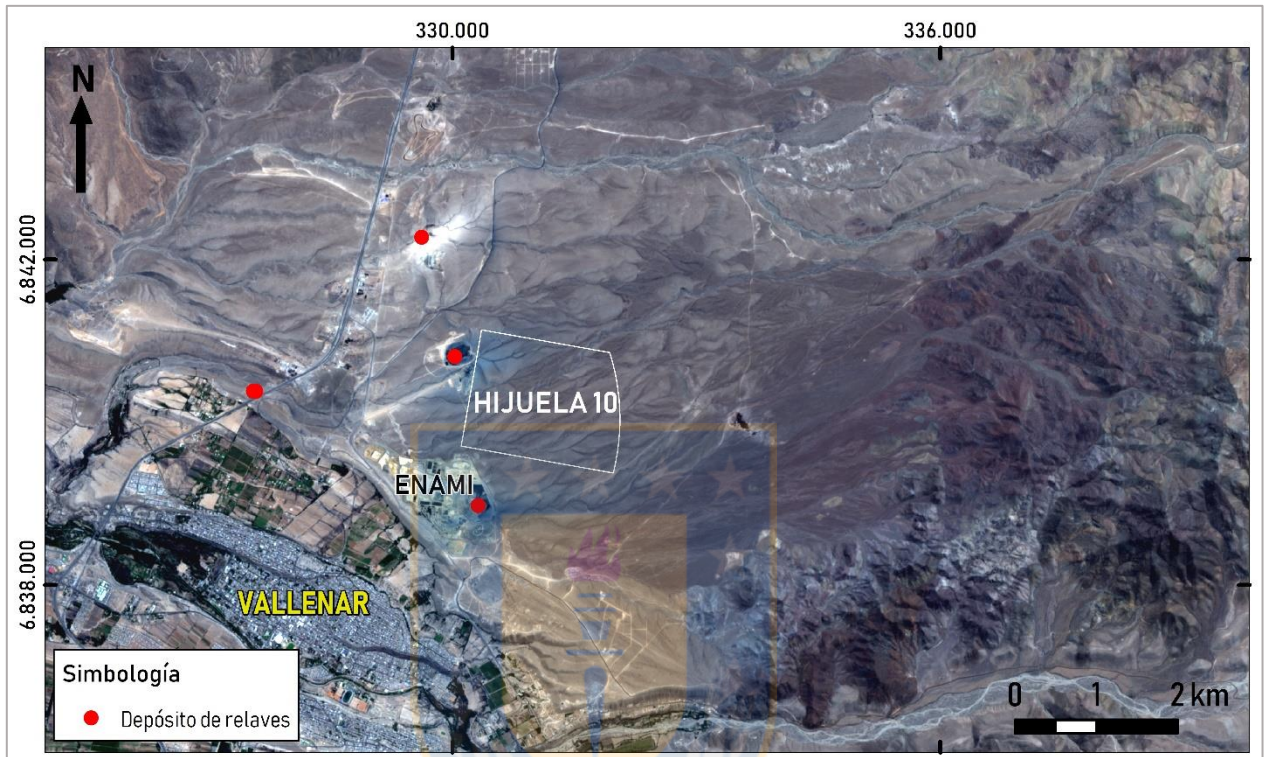


Figura 2: Imagen satelital del área de estudio. Sentinel 2 en color verdadero.

#### 1.4. METODOLOGÍA DE TRABAJO

La fase de estudios preliminares considera la recopilación y revisión de antecedentes geológicos generales para delimitar la zona de estudio y definir la escala de trabajo de acuerdo al nivel de detalle requerido. Esta etapa, además, contempla estudios de geotecnia aplicada al diseño de depósitos de relaves y la búsqueda de casos históricos de desastres desencadenados por colapsos de este tipo de estructuras.

El trabajo también requirió de fotointerpretación de imágenes satelitales con tecnología SIG (ArcGIS 10.4.1; QGIS 3.2.1) para la confección de mapas temáticos, cálculo de complementos de *raster* y ayuda en el mapeo de remociones en masa. Para este último fin se utilizaron imágenes de *Google Earth*, dado que proporcionan la mejor resolución disponible para el análisis a la escala de

estos depósitos. Las imágenes fueron georreferenciadas en coordenadas UTM dentro del sistema WGS84.

Para el estudio de peligros geológicos se revisó información relacionada al área de estudio y se llevó a cabo una búsqueda de metodologías para el análisis de susceptibilidad de procesos de remoción en masa.

El procedimiento utilizado para analizar y evaluar la susceptibilidad a remociones en masa corresponde a la “ponderación de parámetros”, donde se asignan valores a los “factores de predicción”. Para definir dicha ponderación se utilizó de base el sistema de Muñoz (2013) modificado de Lara (2007), herramientas proporcionadas por los *softwares* SIG y la información anotada durante un reconocimiento geológico *in situ*, en el cual participaron geólogos de GMECH e ingenieros encargados del estudio de alternativas tecnológicas y emplazamiento de los depósitos.

En la aplicación de la metodología de Muñoz (2013), el detalle de cada factor es modificado para adaptarlo al tipo de terreno y unidades analizadas, descartando y agregando algunos subfactores.

Finalmente, se confeccionaron mapas de susceptibilidad y zonificación de áreas de propagación de remociones en masa para representar los potenciales peligros a los que se expone la obra proyectada, además de un mapa geotécnico que resume las características geotécnicas del terreno y dicha zonificación de amenazas.

## **1.5. CLIMA, FLORA Y FAUNA**

De acuerdo a la clasificación climática de Köppen, el clima del área de estudio es semiárido, característico del Norte Chico, con precipitaciones de régimen invernal. Esto quiere decir que las precipitaciones son escasas y se concentran principalmente en los meses de invierno. Además, es propio que la mayor parte del total anual ocurra en un tiempo muy breve, a veces en unas cuantas horas.

Las estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca del río Huasco y expuestas al clima de la zona de estudio, tienen una media anual de 52,6 mm de precipitaciones, aunque se debe tener en cuenta que estas pueden variar considerablemente debido al efecto orográfico, disminuyendo a menor elevación. En cuanto a temperatura, la media es de aproximadamente 17,5°C y alcanza sus valores máximos en los meses de verano (Tabla 1).

El bajo régimen pluviométrico determina la semiaridez en la zona. No obstante, casi en todo

**Tabla 1: Promedio de temperatura y precipitaciones mensuales.** Datos de estaciones meteorológicas de la cuenca del río Huasco en clima semiárido con lluvias invernales (años 1999-2018).

<i>Mes</i>	<i>Precipitación acumulada (mm)</i>	<i>Temperatura media (°C)</i>
<b>Enero</b>	0,3	21,0
<b>Febrero</b>	0,1	21,0
<b>Marzo</b>	3,1	19,9
<b>Abril</b>	2,4	17,6
<b>Mayo</b>	13,7	15,4
<b>Junio</b>	10,2	14,1
<b>Julio</b>	13,6	13,7
<b>Agosto</b>	6,1	14,7
<b>Septiembre</b>	1,2	16,1
<b>Octubre</b>	1,4	17,5
<b>Noviembre</b>	0,2	18,8
<b>Diciembre</b>	0,3	20,0
<b>Anual</b>	<b>52,6</b>	<b>17,5</b>

Fuente: Sistema Nacional de Información del Agua (SNIA).

el desierto de Atacama se producen lluvias torrenciales de alta intensidad y corta duración. Estas pueden ser de carácter estacional, debido a la propagación hacia el norte de los sistemas frontales provenientes desde el SW, o producirse por dos procesos menos usuales. Uno de ellos es el fenómeno de El Niño, que se manifiesta aproximadamente cada 10 años (Cobb y otros, 2003; Rutllant, 2005; Vargas y otros, 2007) y provoca un aumento de la frecuencia e intensidad de sistemas frontales. El segundo fenómeno meteorológico corresponde a las bajas segregadas (o núcleos fríos en altura) que pueden afectar al norte de Chile (18,5°-30°S) (Quezada, 2010).

Ahora bien, en un área donde impera un clima semiárido, la ocurrencia esporádica de precipitaciones intensas junto con las condiciones geomorfológicas apropiadas, la harían susceptible de ser afectada por flujos de barro y detritos (“aluviones”) (Vargas y otros, 2000). Por esa posibilidad, este estudio de caracterización de sitio tiene como uno de sus objetivos, identificar los peligros geológicos a los que se expone la obra proyectada y, específicamente, analizar la susceptibilidad a remociones en masa.

Las lluvias torrenciales se señalan como fenómenos anómalos, pero la ocurrencia reiterativa de ellos indica que forman parte del clima (Quezada, 2006), por lo tanto, deberían ser considerados



estadísticamente dentro del régimen de precipitaciones de la zona de estudio.

El análisis estadístico de precipitaciones y un catastro de remociones en masa en sectores cercanos al área podrían ser de utilidad para conocer los umbrales de precipitaciones desencadenantes de estos procesos gravitacionales. Sin embargo, el pronóstico de estos fenómenos suele ser difícil y, en contexto de un clima cambiante a escala global, cabe esperar que los eventos extremos en la región se incrementen y agudicen, y que consecuentemente esta tendencia se exprese también en la severidad de los desastres provocados por los mismos (Castro y otros, 2018).

Las bajas segregadas, como factor a considerar en el pronóstico, son fenómenos atmosféricos típicos de latitudes medias y subtropicales que frecuentemente causan precipitaciones de carácter inusual (Barahona, 2016). Ocurren en cualquier mes del año, pero con mayor frecuencia durante el invierno. Específicamente, en la zona limitada por los 10°S y 30°S y los 65°W y 80°W se ha estimado una frecuencia de ocurrencia de 1,7 bajas segregadas por año desde 1979 hasta 2015 (Rondanelli y otros, 2018). También son bastante dinámicas, ya que así como pueden provocar una lluvia torrencial en un lugar determinado, en otras zonas dejan cielos despejados; por ello son muy erráticas en su interpretación previa.

Lo anterior quiere decir que las bajas segregadas son frecuentes en el norte del país. No obstante, no todas provocan lluvias, y debe ocurrir una serie de condiciones meteorológicas específicas de forma simultánea para que se produzca una tormenta extrema, aunque en el último tiempo su periodicidad ha aumentado (Rondanelli y otros, 2018). En conclusión, ya que no existen patrones claros de precipitación torrencial, la predicción de aluviones en un área específica resulta ser una tarea muy compleja.

En cuanto a biodiversidad, el área de estudio se encuentra en el segmento sur del Desierto Florido, el cual constituye un relevante ecosistema y sitio de conservación en la Región de Atacama (Squeo y otros, 2008). En los llanos y serranías intermedias, entre Vallenar y Copiapó, el desierto destaca por su flora única y singular, entre ellas comunidades dominadas por *Skytanthus acutus* y *Encelia tomentosa* y la aparición ocasional de plantas efímeras, entre las que se encuentran especies de los géneros *Cristaria* y *Calandrinia* (DGA, 2004).

Adicionalmente, el sitio se encuentra a solo 2 km del río Huasco, un oasis en el extremo sur del desierto de Atacama con abundante vegetación ribereña y fauna ictícola (CAZALAC, 2012).

## 1.6. AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quisiera agradecer sinceramente a Matías Oyarzo, por brindarme el tema de esta Memoria de Título, su ayuda desinteresada, confianza y los agradables momentos transcurridos.

También quisiera agradecer de manera especial a mi profesor patrocinante MSc. Abraham González por las preciadas ideas, revisiones, sugerencias y consejos que realizó en el desarrollo de este trabajo.

Asimismo, a los profesores de mi comisión, Sr. Ramiro Bonilla y Dr. Arturo Quinzio, por la revisión crítica de este trabajo y su buena disposición. Además, sus conocimientos contribuyeron a culminar este trabajo de manera óptima y a mi formación como geóloga.

A los funcionarios del Departamento Ciencias de la Tierra. En especial, a don Luis Vásquez del laboratorio de Geomática, por toda su disposición cuando necesité despejar dudas con ArcGIS y el cálido trato para conmigo; a la Sra. Lucy Henríquez, por su buena voluntad y simpatía, y a la Sra. Carolina Rojas, por su vocación de servicio.

Al Sr. Marcelo González por su ayuda desinteresada en el tema SIG, permitiéndome aprender un montón y entretenerme con esta herramienta.

También agradezco encarecidamente a las personas que desde el afecto hicieron posible la elaboración de esta Memoria de Título. En especial, a mis padres por su cariño, paciencia y ser incondicionalmente mi sustento en todo sentido. De igual manera, a mis hermanos, por todo el apoyo brindado; y a Gonzalo, por su inmensa generosidad y ser un pilar en el último tiempo.

Por último, quisiera reconocer a los compañeros de carrera con los que tuve la oportunidad de pasar agradables momentos y que, en más de una ocasión, fueron un gran apoyo tanto en el aspecto académico como personal. Entre ellos quisiera mencionar a Ignacio, por su amistad sincera y hacer más entretenida esta etapa universitaria. Igualmente, a Valentina, José y Claudio, por ser un increíble grupo con el que tuve la suerte de trabajar y crear una amistad que espero perdure en el tiempo.

## **2. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL**

### **2.1. ROCAS ESTRATIFICADAS**

#### **2.1.1. Jurásico Superior-Cretácico Inferior**

##### **2.1.1.1. Formación Punta del Cobre**

Secuencia volcánica y sedimentaria definida por Segerstrom y Ruiz (1962) al sur de Copiapó de variados tipos litológicos, aunque predominantemente volcánica, que aflora como una extensa franja desde Tierra Amarilla hasta la localidad de El Tofo (Camus, 1980; Creixell y otros, 2012). A la latitud de Vallenar, esta franja coincide con el lugar que ocupa la Depresión Intermedia y con la porción más occidental de la Precordillera, por lo que sus afloramientos se encuentran en algunas serranías y cerros bajos. El resto de las rocas se encontrarían bajo depósitos no consolidados neógenos a holocenos (Arévalo y otros, 2009). La unidad sobryace concordantemente rocas de la Formación La Negra (Welkner y otros, 2006 en Arévalo y Welkner, 2008), subyace concordantemente a rocas del Grupo Chañarcillo, fuera de los límites del área (Arévalo y Welkner, 2008), y está en discordancia angular erosiva bajo las Gravas de Atacama y las Gravas del río Huasco (Arévalo y otros, 2009). Además, es intruida por varios plutones y cuerpos hipabisales cretácicos, entre los que destaca el Complejo Plutónico La Higuera (Arévalo y otros, 2009).

Las rocas de la unidad varían desde lavas, rocas epi- y volcanoclásticas, hasta calizas y rocas siliciclásticas. La secuencia está formada por tres secciones y su espesor total estimado es de 3.050 m, con prevalencia de lavas andesíticas.

El contenido faunístico de la sección inferior y dataciones en un domo fragmentado, localizado hacia el techo de la secuencia, confieren a la unidad una edad Titoniano-Aptiano (Creixell y otros, 2012).

#### **2.1.2. Mioceno-Plioceno**

##### **2.1.2.1. Gravas de Atacama**

Depósitos mal a medianamente consolidados, distribuidos entre la Cordillera de la Costa y la Precordillera, que forman terrazas y cubren discordantemente rocas prepaleógenas, entre ellas las de la Formación Punta del Cobre, en una amplia extensión (26-29°S) (Arévalo y Welkner, 2008;

Gabalda y otros, 2005). Están cubiertas por los Depósitos Aluviales y Coluviales Antiguos y el techo lo constituye una superficie de pedimentación (Mortimer, 1973 en Arévalo y otros, 2009).

La unidad está constituida por arenas, gravas y ripios polimícticos, con niveles intercalados de fango y cenizas. Autores como Gabalda y otros (2005) y Riquelme y otros (2006) indican que alcanzaría hasta 400 metros de potencia.

Dataciones radiométricas en capas de cenizas de unidades correlacionables (entre 12 y 15 Ma) y de ignimbritas sobre el nivel de pedimentación de las Gravas de Atacama (entre 9 y 10 Ma), asignan a la unidad una edad Mioceno medio (Arévalo y Welkner, 2008), aunque otros estudios sugieren que la depositación pudo haber ocurrido durante gran parte del Mioceno (Riquelme y otros, 2006).

Del mismo modo como otras unidades aluviales correlacionables (Creixell y otros, 2012), las Gravas de Atacama se asocian a la degradación del relieve y la sedimentación en depresiones ubicadas entre cordones hoy en día muy erosionados. Estas paleodepresiones habrían constituido profundos sistemas de drenaje que nacían en la Precordillera y disectaban la región de antearco, por lo que el relleno habría resultado de la interacción mixta de procesos aluviales, fluviales y coluviales (Riquelme y otros, 2006); asociado, además a volcanismo sincrónico (Arévalo y Welkner, 2008).

#### **2.1.2.2. Gravas del Río Huasco**

Depósitos fluviales y aluviales aterrazados, ubicados a ambos lados del río Huasco hasta las inmediaciones de la ciudad homónima, constituyendo hasta 6 terrazas en ciertos afloramientos (Riveros y Riquelme, 2009). La unidad sobreyace en inconformidad plutones del Cretácico Inferior, y en discordancia angular erosiva rocas volcánicas de la Formación Punta del Cobre y del Complejo Epimetamórfico Chañaral. Además, subyace concordantemente a depósitos no consolidados (aluviales, eólicos y litorales) del Pleistoceno-Holoceno (Arévalo y Welkner, 2008).

Comprenden ripios, gravas y arenas no consolidados a levemente cementados. Riveros y Riquelme (2009) describen gravas pobremente estratificadas, mal clasificadas texturalmente, soportadas por la matriz y con abundantes clastos fuertemente meteorizados. Arévalo y Welkner (2008) indican, además, la existencia de niveles intercalados de limos y capas decimétricas de cenizas vítreas. En las inmediaciones de Vallenar, la unidad alcanza 120 m de espesor (Riveros y Riquelme, 2009).



Arévalo y Welkner (2008) asignan a la unidad una edad Mioceno-Plioceno a partir de vidrio obtenido en una capa de cenizas de edad  $13,0 \pm 1,5$  Ma y por estar bajo los Depósitos Litorales de edad Pleistoceno-Holoceno (determinada por su contenido faunístico).

Las Gravas del Río Huasco fueron formadas por la depositación fluvial y aluvial de material erosionado proveniente de la Cordillera de Los Andes, la Precordillera y la Cordillera de la Costa (Arévalo y Welkner, 2008).

### **2.1.2.3. Depósitos Aluviales y Coluviales Antiguos**

Depósitos de gravas y ripios mal a moderadamente consolidados que constituyen conos aluviales individuales o coalescentes y depósitos coluviales adosados a las zonas topográficamente altas. Se encuentran en concordancia sobre las Gravas de Atacama y bajo depósitos aluviales pleisto-holocenos (Arévalo y otros, 2009). No existen datos directos de edad, pero los mismos autores sugieren que la unidad es del Mioceno superior-Plioceno debido a las edades que ellos asignan a las unidades que subyacen y sobreyacen.

### **2.1.3. Pleistoceno-Holoceno**

#### **2.1.3.1. Depósitos Aluviales Inactivos**

Acumulaciones de ripios, gravas y arenas que ocupan laderas de baja pendiente y rellenan quebradas. Son moderadamente consolidados y están formados por clastos, de tamaño grava y arena gruesa, heterocomposicionales y subangulosos en matriz limo-arenosa (Arévalo y otros, 2009).

#### **2.1.3.2. Depósitos Aluviales Activos**

Acumulaciones de ripios, gravas y arenas que se restringen a cauces someros y recientes, no están consolidados y cortan los depósitos inactivos. Rellenan ciertas depresiones como quebrada Valparaíso, al noroeste de Vallenar, y quebrada Los Apestados, al norte de la ciudad. Tanto depósitos activos como inactivos se producen por flujos aluviales asociados a episodios pluviales esporádicos, usualmente de gran intensidad (Arévalo y otros, 2009).

#### **2.1.3.3. Depósitos Fluviales Activos**

Depósitos no cohesivos a moderadamente consolidados, asociados directamente al curso actual del río Huasco. Riveros y Riquelme (2009) los describen como una sucesión

granodreciente compuesta por gravas, arenas y limos estratificados con buena clasificación textural y desarrollo de imbricación de clastos. Se apoyan sobre las Gravas del Río Huasco y su espesor aumenta gradualmente hacia el oeste, hasta un máximo que no supera los 8 metros.

## 2.2. ROCAS ÍGNEAS

### 2.2.1. Cretácico Inferior

#### 2.2.1.1. Complejo Plutónico La Higuera

El Complejo Plutónico La Higuera es un cuerpo estrecho y elongado en dirección NNE-SSW, distribuido a lo largo de aproximadamente 90 km, y que intruye a la Formación Punta del Cobre. Se han reconocido dos subunidades: una basal, formada por granodioritas, tonalitas y granitos de piroxeno y anfíbol de grano fino a medio, y una superior principalmente diorítica (Arévalo y otros, 2009). La subunidad granodiorítica se expone en la sierra Marañón, al noroeste de Vallenar. Diferentes dataciones  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  entregan edades que oscilan entre  $127,9 \pm 1,5$  Ma y  $122,1 \pm 1,3$  Ma (Arévalo y Welkner, 2008; Creixell y otros, 2012).

En la Figura 3 se muestra la distribución espacial de esta y el resto de las unidades descritas en el capítulo.

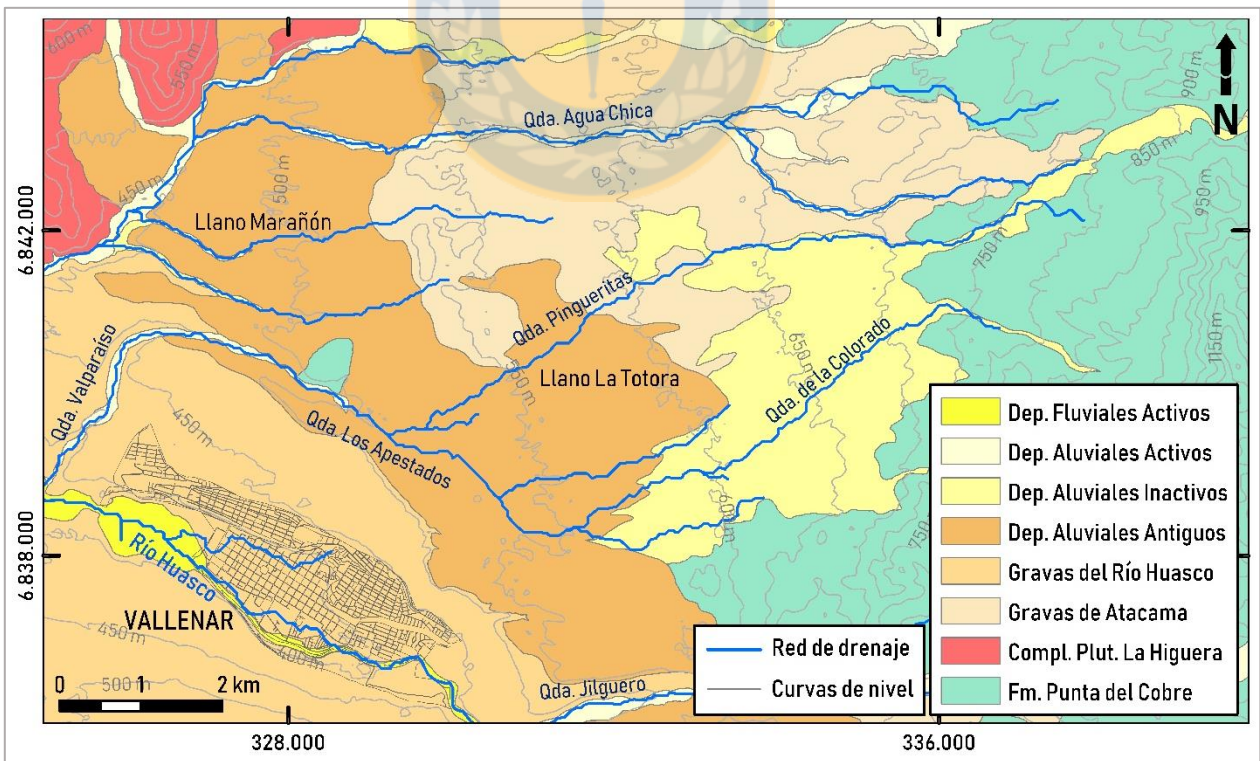


Figura 3: Geología del área de estudio. Basado en la Geología del Área Vallenar-Domeyko (Arévalo y otros, 2009).

### 2.3. ESTRUCTURAS

Los principales rasgos estructurales presentes en la región, y en el área Vallenar-Domeyko, están asociados a las unidades morfoestructurales. De oeste a este, están la Cordillera de la Costa, la Depresión Intermedia y la parte más occidental de la Cordillera de Los Andes, denominada Precordillera de Vallenar.

El principal sistema estructural de la Cordillera de la Costa del norte de Chile corresponde al Sistema de Falla de Atacama y sus estructuras de orientación NS a NNE-SSW. El conjunto de fallas se extiende desde los 20°S hasta, al menos, los 28,5°S. En dicha prolongación se han definido tres segmentos principales (Salar del Carmen, Paposo y El Salado-Vallenar) (Charrier y otros, 2007). El último segmento se caracteriza por la presencia de numerosas trazas subparalelas, y a diferencia de los segmentos anteriores, los escarpes son discontinuos debido a numerosos drenajes que los atraviesan (Quezada, 2010). Los rasgos estructurales más antiguos en el área Vallenar-Domeyko forman parte de este segmento (Arévalo y otros, 2003 en Arévalo y otros, 2009). Además, este sistema se asocia a un evento de extensión temprana entre los 127 y 122 Ma, lo que coincide con el emplazamiento de complejos plutónicos, y otro de transpresión sinistral entre los 122 y 120 Ma (Arévalo y otros, 2009).

El plegamiento que presentan las rocas al este del área de estudio (Grupo Chañarcillo) también sugiere un cambio en la tectónica de extensiva a compresiva, el cual se asocia a la fase Sub-Hercínica del Albiano-Cenomaniano. Esto es atribuible al cambio en el régimen de subducción de tipo Marianas a una de tipo Chilena (Uyeda y Kanamori, 1979), que persiste hasta la actualidad.

En la precordillera existen fallas extensionales de orientación NS, como la falla Agua de Los Burros que habría actuado durante el Cretácico Superior (Arévalo y otros, 2009), hasta el desarrollo de estructuras de inversión en dichas fallas, lo cual pudo haber ocurrido antes del Maastrichtiano (Fase Larámica). Este último evento compresivo se asocia también a un segundo plegamiento de las rocas del Grupo Chañarcillo.

Las estructuras más jóvenes de la carta están representadas por un conjunto de fallas inversas y pliegues en la Depresión Intermedia, específicamente, en el llano Marañón. En este lugar, las Gravas de Atacama aparecen deformadas en pliegues anticlinales abiertos y desplazadas por fallas inversas con manteo hacia el este. La deformación documentada por estas estructuras estaría restringida a un período acotado dentro del Mioceno superior-Plioceno, ya que los depósitos del Pleistoceno-Holoceno no exhiben deformación (Arévalo y otros, 2009).

Cabe destacar además que, durante el Mioceno, entre los 27° y 33°S, se produjo una rápida disminución del ángulo de subducción que culminó con la situación de subducción plana, rasgo de primer orden que actúa hasta hoy en día y se manifiesta con una cordillera principal “avolcánica”. El aplanamiento de la zona de Benioff produjo la extinción del arco magmático debido a la desaparición de la cuña astenosférica caliente entre la placa oceánica subductada y la base de la litósfera continental (Kay y otros, 1987 en Moscoso y Mpodozis, 1988).



### 3. GEOMORFOLOGÍA

#### 3.1. FISIOGRAFÍA

En general, el relieve de la Región de Atacama se caracteriza por la alternancia sucesiva de cordones montañosos de orientación aproximadamente NS y valles transversales a estos, responsables de la expresión debilitada (hasta ausente) de la Depresión Intermedia, que se desarrolla entre la Cordillera de la Costa y la Precordillera.

En particular, el sitio Hijuela 10 se encuentra en una explanada bastante amplia ubicada entre la Cordillera de la Costa y la Precordillera, donde la superficie está totalmente cubierta por material aluvial. El punto más alto se encuentra a 1.269 m s.n.m. en serranías en que afloran rocas volcánicas, mientras que el sitio de interés está a una altura media aproximada de 593 m s.n.m.

El cauce del río Huasco nace en la confluencia del río El Carmen y río El Tránsito y controla el desarrollo de un valle transversal con intensa actividad erosiva. Este presenta un trazado recto a sinuoso y los materiales asociados corresponden principalmente a sedimentos de arrastre de granulometría limo-arcillosa a arenas y granos producto de la erosión de depósitos aluviales. En su curso inferior, desde la quebrada El Jilguero, a 5 km al oriente de Vallenar, hasta la desembocadura en el mar, con longitud de 55 km, la caja del río se ensancha y el valle se presenta acompañado de numerosas y extensas terrazas fluviales. El lecho del río en el área de estudio se encuentra a 400 m s.n.m. aproximadamente, lo cual da cuenta de una gran incisión vertical.

La formación de las terrazas pudo haber sido en respuesta a un incremento del basculamiento de la región interna del antearco durante el Mioceno superior (Riquelme y otros, 2006), lo cual ha socavado los depósitos aluviales, incluyendo las Gravas de Atacama. En ese sentido, las terrazas fluviales escalonadas constituyen las evidencias más recientes del alzamiento y la dinámica fluvial que ha prevalecido en esta zona.

En los niveles superiores de aterramiento, donde se encuentra Hijuela 10, se forma una superficie subhorizontal y poco accidentada, que presenta leves depresiones de dos a tres metros que socavan a las gravas e incipientes niveles de erosión relacionados a líneas de drenaje antiguas (Figura 4).





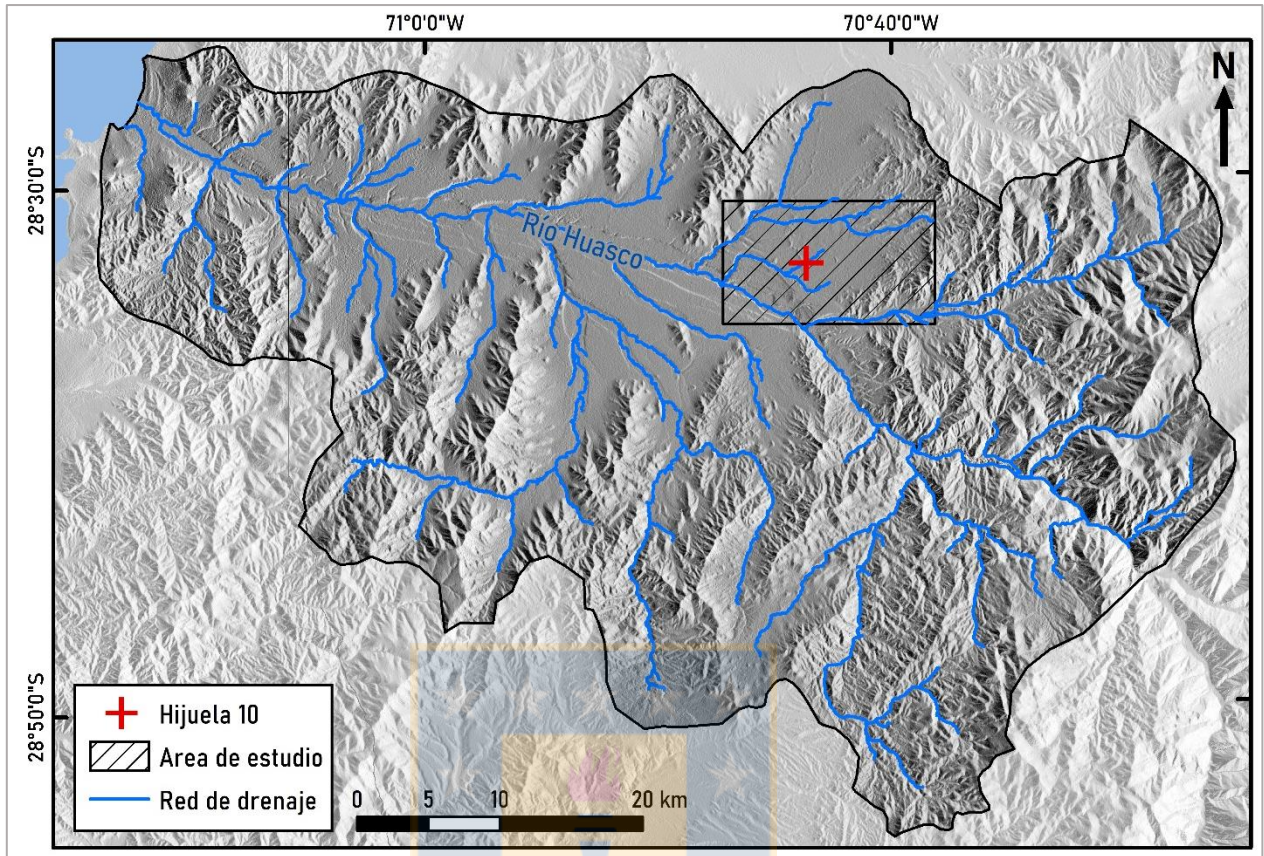
**Figura 4: Llanura en el área de Hijuela 10 con líneas de drenaje incipientes.**

### **3.2. HIDROGEOLOGÍA**

El único curso de escorrentía permanente del área corresponde al río Huasco y se encuentra a unos 4 km al suroeste de Hijuela 10. El río se forma en el sector de Junta del Carmen, por la confluencia de sus dos tributarios principales: los ríos El Carmen y El Tránsito, a 90 km de su desembocadura en el océano Pacífico (DGA, 2013).

La cuenca hidrográfica se extiende desde los 28°27' y 29°33'S y los 71°11' y 69°56'W, y tiene una superficie de 9.813 km<sup>2</sup>. Se compone de tres subcuencas y ocho cuerpos acuíferos. Particularmente, el área de estudio se ubica dentro de la subcuenca Río Huasco, de 2.660 km<sup>2</sup> de superficie (Figura 5), y el acuífero Vallenar Alto (DGA, 2013).

Las aguas superficiales, a nivel de cuenca varían de sulfatadas cálcicas a más sódicas mientras que en las aguas subterráneas la carga aniónica es de carácter clorurada sulfatada. En el primer caso, Ávalos y otros (2009) interpreta que la composición tiene influencia litológica, pues los suelos del valle del Huasco y sus afluentes en el curso medio son derivados de materiales aluviales sin salinidad o muy ligera. Aunque las aguas que circulan próximas a la superficie apenas interactúan con el terreno, por lo que la baja concentración de cloruros también puede ser debido a este motivo. La composición clorurada de las aguas subterráneas, en tanto, puede provenir de zonas de recarga cercanas a la costa (Ávalos y otros, 2009).



**Figura 5: Mapa de sombras de la subcuenca Río Huasco.** El río constituye el eje de la red de drenaje y diversas quebradas son sus afluentes.

En la zona donde se inserta el área de estudio se reconocen tres unidades hidrogeológicas en función de rangos estimativos de permeabilidad. La primera unidad corresponde a medios intergranulares de permeabilidad moderada a alta, con valores mayores a  $1 \times 10^{-6}$  m/s. La segunda, a medios intergranulares y fracturados de permeabilidad moderada a baja, entre  $1 \times 10^{-6}$  y  $1 \times 10^{-9}$  m/s. Y la tercera, a medios rocosos de permeabilidad muy baja a nula, con valores inferiores a  $1 \times 10^{-9}$  m/s (DGA, 2013).

En la unidad de mayor permeabilidad se distinguen dos subunidades: 1) Depósitos sedimentarios de origen fluvial de alta permeabilidad ( $k > 1 \times 10^{-4}$  m/s), compuestos por sedimentos fluviales recientes, distribuidos a lo largo del valle del río Huasco y, 2) Depósitos fluvio-aluviales, gravitacionales, coluviales y eólicos costeros de edad cuaternaria que, mayoritariamente, rellenan valles y quebradas correspondientes a drenajes tributarios al río Huasco. Tienen una permeabilidad media ( $1 \times 10^{-6}$  a  $1 \times 10^{-4}$  m/s) a localmente alta ( $1 \times 10^{-4}$  a  $1 \times 10^{-3}$  m/s) (DGA, 2013).

La segunda unidad, de menor permeabilidad que la primera, está compuesta principalmente por gravas de origen aluvial poco consolidadas. Su distribución general ocurre en forma paralela

al eje del río Huasco, bordeando tanto el valle fluvial actual como algunos tributarios mayores. Estos depósitos representan el paleorelleno del valle del río Huasco y actualmente se encuentran aterrizados. La permeabilidad de la unidad es moderada a baja ( $1 \times 10^{-6}$  a  $1 \times 10^{-9}$  m/s).

La tercera unidad la componen todas las rocas intrusivas, metamórficas y volcánico-sedimentarias de la cuenca. En superficie, la cobertura de meteorización es, por lo general, inferior a un metro de espesor y la fracción arcillosa es baja ( $< 10\%$ ). En particular, las rocas de las secuencias volcánico-sedimentarias tienen una escasa cubierta regolítica. En subsuperficie, esta unidad se localiza a una profundidad máxima estimada en unos 200 m. Aunque las unidades geológicas de interés, desde el punto de vista de la existencia y conducción de aguas subterráneas, son los rellenos cuaternarios que conforman las dos primeras unidades hidrogeológicas.

Esto se aprecia en perfil a lo largo del curso del río Huasco, donde la permeabilidad de las unidades cambia de baja a media-alta al pasar de rocas volcánico-sedimentarias en la Cordillera de Los Andes a depósitos no consolidados en la Depresión Intermedia (DGA, 2004). Cabe destacar que en el sector de Vallenar y unos 5 km aguas abajo, se pueden encontrar las mayores potencias de relleno sedimentario (DGA, 2013).

Los niveles estáticos son variables a lo largo y ancho del valle, siendo más profundos en las zonas más alejadas al río Huasco y alcanzando niveles más someros en las cercanías de este (Ávalos y otros, 2009). Estudios concluyen que el nivel freático, en el sector de Vallenar y alrededores, se encuentra a profundidades entre 15 y 20 m (DGA, 2013).

Los tributarios principales del río nacen en la alta Cordillera de Los Andes, por lo que su régimen es nival. Todas las estaciones fluviométricas en esta cuenca muestran esta fuerte influencia, aunque se aprecia también un pequeño aporte pluvial en las estaciones que se ubican en la parte baja del curso del río. De todas formas, aun a unos 3 km aguas abajo de la confluencia de sus tributarios y cerca de la desembocadura, el río Huasco presenta sus mayores caudales en diciembre y enero, producto de deshielos, y bajos caudales en invierno, tal como ocurre en sectores cordilleranos de la cuenca.

En el análisis de imágenes satelitales se verifica que la red de drenaje del área de estudio forma parte del aporte pluvial de la subcuenca, ya que en esta porción de la Precordillera no existe acumulación de nieve. Estas quebradas drenan hacia el valle del Huasco como afluentes intermitentes, siguiendo una topografía bastante plana y una trayectoria relativamente corta (menos de 20 km).



## 4. GEOLOGÍA LOCAL

### 4.1. DEPÓSITOS NO CONSOLIDADOS

Dentro de Hijuela 10, las unidades geológicas reconocidas corresponden exclusivamente a depósitos no consolidados, los cuales configuran un relleno sedimentario que cubre completamente la roca basal. Precisamente, en el sector de Vallenar hasta unos 5 km aguas debajo de esta ciudad, se pueden encontrar los mayores espesores, alcanzando hasta 200 m aproximadamente (DGA, 2013).

#### 4.1.1. Gravas de Atacama

Las Gravas de Atacama se distribuyen en la porción noroccidental del sitio, donde forman pequeños montículos que sobresalen entre los depósitos sedimentarios que conforman la llanura aluvial (Figura 6).



**Figura 6: Montículos dentro de Hijuela 10 donde se presentan las Gravas de Atacama.**

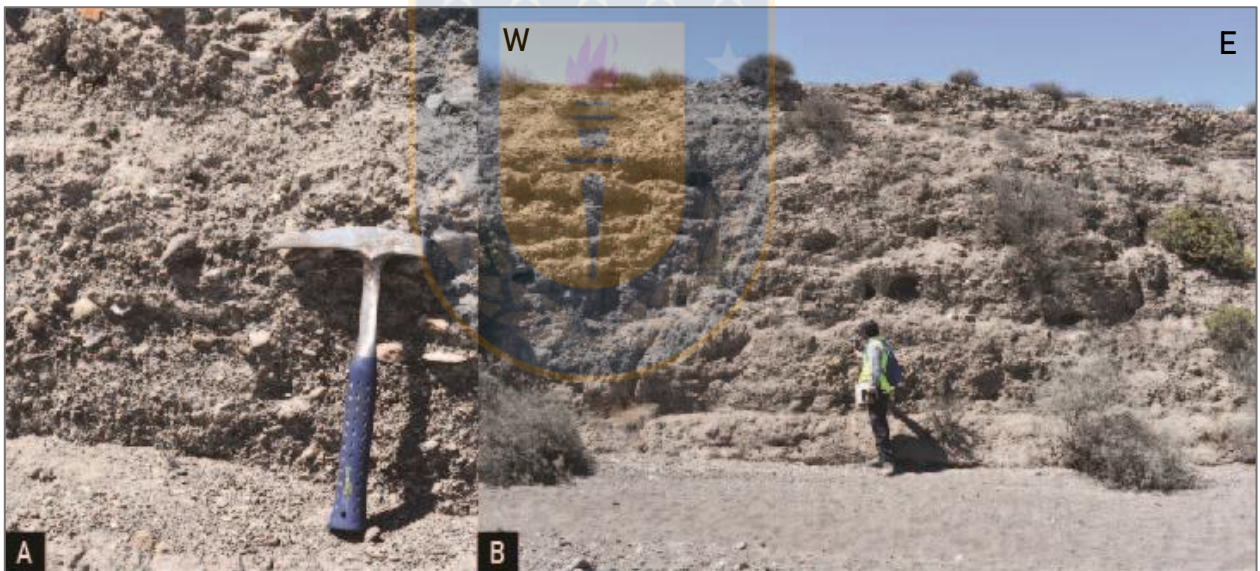
El conjunto está compuesto por bolones polimícticos con buen redondeamiento, que alcanzan diámetros de hasta 50 cm, pero en los que predomina la fracción entre 10 y 20 cm, inmersos en una matriz fango-arenosa. Presenta pobre selección, fábrica matriz-soportada y escaso a ausente desarrollo de suelo.

Si bien no es posible medir la potencia completa de la unidad, se infiere que constituyen gran parte del relleno sedimentario en el sector (Gabalda y otros, 2005).

#### 4.1.2. Depósitos Aluviales y Coluviales Antiguos

Corresponden a ripios y gravas, con arenas y limos, parcialmente estratificados, pobremente seleccionados y moderadamente compactados.

En los sectores donde estos depósitos aluviales se encuentran cortados por la quebrada Pingueritas, las paredes muestran clastos integrados por ripios, gravas y arenas de composición polimíctica, con formas subredondeadas a subangulosas, inmersos en abundante matriz fango-arenosa (Figura 7A). Estos depósitos forman parte de la cobertura de la llanura aluvial sobre la cual se inscribe el terreno Hijuela 10, cubriendo completamente la roca basal o las Gravas de Atacama, con espesores que superan los 6 m, de acuerdo a lo que puede observarse en las porciones más profundas de la quebrada Pingueritas (Figura 7B).



**Figura 7: Secciones de los Depósitos Aluviales y Coluviales Antiguos.** A) Sección de la unidad con abundante grava inmersa en una matriz areno-fangosa. B) Ladera norte de quebrada Pingueritas.

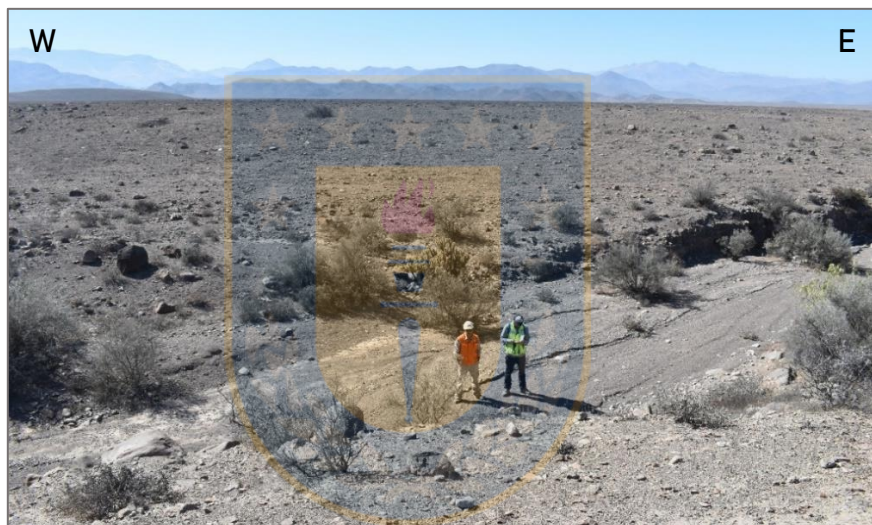
En los cortes se exhibe el buen grado de compactación que tiene esta unidad, lo que se expresa en materiales bien trabados con buenas condiciones de estabilidad natural. También presentan escaso desarrollo de suelo.

### 4.1.3. Depósitos Aluviales Activos

Corresponden a depósitos recientes de gravas acumuladas en canales de escorrentía o cauces de actividad esporádica que se han desarrollado sobre los depósitos aluviales inactivos.

El material del fondo es mayoritariamente fango-arenoso, mientras que, en las laderas se observan bloques angulosos, de hasta 0,5 m de diámetro. Debido a su estado inalterado, se reconoce el origen eminentemente sedimentario y volcánico de los clastos. En general, tienen mejor selección que los otros depósitos, pero son menos compactos.

Los canales, de trazado relativamente sinuoso, forman una red que se integra a la red hídrica del río Huasco. El más notorio y continuo es la quebrada Pingueritas, que cruza Hijuera 10 en dirección NE-SW desde las serranías ubicadas al este del llano La Totora (Figura 8).



**Figura 8: Quebrada Pingueritas con relleno de material fino inserta en llanura aluvial.**

La mayoría de los sedimentos de esta unidad correspondería a la porción fina de los sedimentos superficiales sueltos de los depósitos mencionados anteriormente, arrastrados en periodos normales de escorrentía hasta el fondo de dichos cauces. Los clastos de mayor tamaño, por su parte, estarían asociados a episodios aluviales de mayor intensidad.

## 4.2. CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DE LOS SEDIMENTOS

Las características geotécnicas de los componentes geológicos de un terreno tienen implicancias en el diseño, construcción y operación de cualquier obra de ingeniería. Por ello, saber si dichos materiales corresponden a rocas, sedimentos o suelo es la primera consideración que debe



tenerse para continuar con el estudio de sus especificaciones y poder determinar el potencial de aquel terreno para el emplazamiento de depósitos de relaves.

El terreno de Hijuela 10 está conformado por depósitos no consolidados, los cuales están constituidos por sedimentos clásticos cuyo tamaño de grano predominante es superior a 0,075 mm y exhiben escaso desarrollo de suelo. Aunque, en general, los suelos del valle del Huasco se describen como xerosoles cálcicos y litosuelos, de poco espesor (10 cm), de textura suelta, franco-arenosos, de color pardo en su superficie y textura más pesada en profundidad (DGA, 2004).

La resistencia de dichos materiales depende de sus propiedades texturales (Tabla 2), como la forma de las partículas, la distribución granulométrica o selección y el tamaño de los granos.

**Tabla 2: Resumen de los parámetros texturales de las unidades reconocidas en Hijuela 10.**

	<i>Tamaño de grano</i>	<i>Redondez</i>	<i>Selección</i>	<i>Fábrica</i>	<i>Compactación</i>
<b>Gravas de Atacama</b>	>0,075 mm	Subredondeada a subangulosa	Pobre	Matriz	Densa
<b>Depósitos Aluviales y Coluviales Antiguos</b>	>0,075 mm	Subredondeada a subangulosa	Pobre	Matriz	Medianamente densa a densa
<b>Depósitos Aluviales Activos</b>	>0,075 mm	Subredondeada a subangulosa	Moderada	Matriz	Suelta

En los tres parámetros mencionados la influencia sobre la resistencia es sencilla e intuitiva (González de Vallejo y otros, 2002). En ingeniería, un “suelo” bien graduado es un material no consolidado que posee partículas de variado tamaño, lo cual mejora la capacidad de estibación y su resistencia. Mientras que, un suelo con buena selección cuenta también con mayor porosidad y, por ende, menor resistencia. Por este motivo, en gran parte del área de estudio, el suelo tiene una estructura densa y resistente, por la pobre selección de sus granos. En depósitos algo más consolidados, a mejor selección, mayor cantidad de espacios intergranulares que puede ocupar el cemento, el cual es un agente que influye mejorando considerablemente la cohesión y, por ende, aumentando la resistencia.

En lo relativo al tamaño de grano, resultará más difícil hacer deslizar y rodar entre sí partículas grandes que partículas pequeñas y, respecto a la forma, lo mismo será más sencillo entre partículas redondeadas que entre granos angulosos e irregulares. Por lo que, un terreno como Hijuela 10, con abundante grava, bien graduada y de cantos subangulosos, es considerado resistente y con baja susceptibilidad a deslizar y rodar partículas entre sí. Dicha presunción se establece analizando solo estos tres parámetros.

El bajo contenido de finos permite estimar cualitativamente que el suelo de Hijuela 10 es no plástico (Tabla 3), lo cual también influye mejorando la resistencia del terreno.

**Tabla 3: Criterios para estimar cualitativamente la plasticidad de un material (SERNAGEOMIN, 2007).**

<i>Plasticidad</i>	<i>Descripción del material</i>	<i>Equivalencia con ensayos de laboratorio</i>
<b>Alta</b>	Arcillas inorgánicas de apariencia grasosa, limos inorgánicos	LL > 50
<b>Media</b>	Arcillas magras, limos	35 < LL < 50
<b>Baja</b>	Arcillas inorgánicas, arcillas gravosas, arcillas arenosas, arcillas limosas, limos inorgánicos, arenas muy finas, polvo de roca con algún contenido de arcillas o limos, arenas finas arcillosas o limosas, limos arcillosos	LL < 35
<b>No plástico</b>	Gravas, Arenas, polvo de roca, suelos gravosos o arenosos con muy bajo contenido de finos	No es posible realizar el ensayo

La compactación o compacidad está vinculada con el índice de poros y la humedad del suelo y constituye otro factor en la resistencia. En ese sentido, ya que el suelo superficial del sitio de estudio está bien graduado, también tiene un bajo índice de poros. Además, la humedad del terreno es baja debido a su alto contenido de gravas que, por la inactividad de su superficie, no retienen el agua. Por ende, se trata de un suelo denso a medianamente denso y compacto, lo cual lo hace más resistente a las tensiones tangenciales (esfuerzo cortante). Además, es común que la compactación o compacidad del tipo de material sedimentario presente en el terreno registre un constante y persistente incremento a medida que se profundiza.

Adicionalmente, la permeabilidad moderada ( $1 \times 10^{-6}$ - $1 \times 10^{-4}$  m/s) a localmente alta ( $1 \times 10^{-4}$ - $1 \times 10^{-3}$  m/s) da lugar a succiones relativamente altas y a un bajo contenido de humedad, lo cual produce suelos no saturados. Los depósitos a mayor profundidad como las Gravas de Atacama tienen permeabilidad moderada a baja, entre  $1 \times 10^{-6}$  y  $1 \times 10^{-9}$  m/s (Ávalos y otros, 2009; DGA, 2013).

Cabe destacar que debido a la naturaleza de los flujos que forman estos depósitos, es común que se produzcan diferencias en el tamaño de grano de acuerdo a la distancia con respecto a la fuente y que esto, por tanto, dé lugar a variaciones longitudinales de permeabilidad. A pesar de lo anterior, lo que se aprecia a nivel superficial es que las unidades presentan cierta homogeneidad textural, y solo ocurren ligeras variaciones granulométricas en algunos niveles estratigráficos

observados en los cortes. Además, se reconocen diferencias entre unidades distintas, ya que los depósitos más jóvenes provienen de la erosión y transporte de los más antiguos.

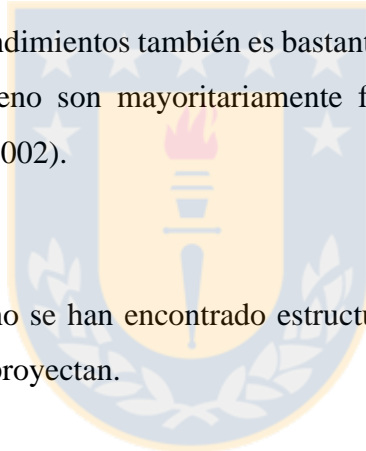
Por otro lado, debido al ambiente al que se relacionan los sedimentos, el contenido de arcilla es bastante bajo. Por esta razón, se espera que el suelo se comporte de manera químicamente estable y resistente, sin que modificaciones antrópicas que se efectúen en el futuro produzcan cambios importantes en la estructura de los minerales presentes en los fragmentos de rocas.

Los depósitos coluviales, por su parte, son materiales que provienen de la alteración *in situ* de las rocas u otros depósitos y son transportados posteriormente como derrubios de ladera, por efecto de la gravedad y acción del agua. En consecuencia, se interpretan como masas inestables, pero ello depende en gran medida de la potencia que alcance el depósito (González de Vallejo y otros, 2002). En el caso del área de estudio, el espesor no alcanza a ser significativo y no constituye un problema geotécnico.

La susceptibilidad a hundimientos también es bastante baja en Hijueta 10, ya que los suelos granulares que cubren el terreno son mayoritariamente firmes a densos y poco deformables (González de Vallejo y otros, 2002).

### **4.3. ESTRUCTURAS**

En el área Hijueta 10 no se han encontrado estructuras geológicas que puedan afectar la integridad de las obras que se proyectan.



## 5. DEPÓSITOS DE RELAVES

### 5.1. GENERALIDADES

Un depósito de relaves es una obra de ingeniería diseñada para contener material de descarte en operaciones mineras, de modo que se aíse del ecosistema circundante. Dicho material, también denominado relave, corresponde a una suspensión de sólidos en líquidos que representa la parte no económica obtenida de la concentración húmeda de especies minerales para la producción de metales de valor comercial. Además de dar solución al problema de contención definitiva de las partículas sólidas de los relaves, estos depósitos retienen temporalmente los efluentes líquidos y conservan el agua para su reutilización.

Mineralógicamente, los relaves están constituidos casi en su totalidad por minerales formadores de rocas y la ganga de alteración hidrotermal, aunque pueden contener un pequeño porcentaje de minerales valiosos que no pudieron ser recuperados desde el proceso de flotación. Por esta razón, legislativamente en Chile, los relaves no son considerados sustancias tóxicas ni peligrosas. Sin embargo, dependiendo de la geoquímica del yacimiento de origen y la tecnología de metalurgia extractiva utilizada para los procesos, los residuos mineros pueden tener elementos tóxicos en bajas concentraciones como arsénico, plomo, mercurio, cadmio, entre otros (SERNAGEOMIN, 2018). Además, al producirse interacciones químicas con agua, algunos compuestos pueden volverse nocivos con el tiempo. De esta manera, la toxicidad puede aparecer en estados posteriores al procesamiento de los minerales.

Aparte de las implicancias que tiene la composición de los relaves en sí, están las repercusiones del aumento sostenido de estos residuos con el tiempo. En la medida que el sector minero crece, mayor es la cantidad de desechos. Entre las razones de esta aseveración está la caída en la ley de los minerales, ya que de la ley depende cuántos desechos se producen durante el proceso de separación selectiva. En la actualidad, la mayoría de las menas de cobre que abastecen plantas concentradoras tienen en promedio una ley menor de un 1% (Tabla 4; COCHILCO, 2017). Lo que significa que, de cada tonelada de mena, más de 990 kilogramos constituirán relaves.

Como consecuencia directa de las bajas leyes de mineral y su disminución sostenida en el tiempo, se proyecta que el tonelaje actual de relaves aumente considerablemente con los años.

**Tabla 4: Ley media anual de cobre en plantas concentradoras.**

<i>Año</i>	<i>Ley mineral (%)</i>
2007	1,05
2008	0,97
2009	0,97
2010	0,92
2011	0,87
2012	0,85
2013	0,89
2014	0,9
2015	0,87
2016	0,81
<b>Promedio</b>	0,91

## 5.2. RIESGOS AMBIENTALES

Según antecedentes públicos actualizados de SERNAGEOMIN, la composición química de los relaves del país abarca un 99,06% de elementos mayores, los cuales son inocuos en cuanto a amenazas ambientales. Con todo, el mismo organismo reconoce que el 0,94% restante corresponde a compuestos de connotación ambiental como contaminantes de las aguas, por lo que hay que tener el resguardo de que, en su interacción con los factores ambientales, no causen impactos que impliquen un riesgo significativo para la salud de las personas y/o para el medio.

Hay que tener en cuenta que los depósitos son instalaciones remanentes y dinámicas, es decir, permanecen tras el cese de la actividad y, además, se encuentran expuestos continuamente a diversas situaciones operacionales y/o naturales que pueden llegar a comprometer su estabilidad física y/o química (Fundación Chile, 2018). Por ello, los problemas relacionados a este tipo de obras son de diferente índole y debido a distintas causas. No obstante, históricamente, la mayoría de los accidentes ocurridos están ligados a fallas en la estabilidad física y los mayores desastres registrados han sido ocasionados por colapsos y derrame de material.

Un colapso se entiende como la liberación de un volumen importante de masa de relave, resultado de una falla estructural del depósito y que produce un impacto ambiental significativo. Una vez ocurrida la ruptura de la estructura, el material acumulado puede desplazarse como un flujo de gran energía y resistencia, adquiriendo las características de un proceso de remoción en masa muy destructivo.



Al respecto, los accidentes que ocurrieron en el pasado dieron inicio a la elaboración de normativas aplicadas a estos depósitos para regular su construcción y operación, lo cual ha contribuido enormemente en la minimización del riesgo. Gracias a los avances en el conocimiento y la tecnología que es empleada actualmente en la construcción de los depósitos, los colapsos ya no son un peligro inminente. Pero aún existe la problemática asociada a un centenar de instalaciones abandonadas que no están adecuadamente cerradas. Son estas las que suponen una mayor amenaza, en cuanto a sus condiciones de estabilidad física.

Además, hay que tener en cuenta que, aparte de los desastres por colapsos, los depósitos de relaves implican una serie de riesgos al contener contaminantes de aguas, suelos y/o aire.

### **5.2.1. Contaminación de aguas**

Este tipo de riesgo puede ser provocado por distintas causas y dar lugar a variados efectos. Existen registros de arrastres de desechos y residuos causados por lluvias, crecidas de ríos y avalanchas (Hauser, 2000), lo que puede provocar acidificación de las aguas; solubilización de metales y contaminación de ríos y acuíferos.

La interacción de los relaves con diferentes factores (principalmente agua, oxígeno y actividad microbológica) puede desencadenar una serie de procesos geoquímicos cuyo principal resultado es la formación de fluidos, conocidos como drenajes o aguas de contacto, que pueden infiltrar, alcanzando a las aguas subterráneas o superficiales circundantes al depósito. Esta situación denota una condición de inestabilidad química dentro del depósito (Fundación Chile, 2018).

Algunos de los impactos relacionados al drenaje ácido son el daño a la flora y fauna, tanto terrestre como acuática. Del mismo modo, las condiciones de acidificación pueden favorecer la solubilización de metales en el agua, aumentando el potencial daño a la salud de las poblaciones cercanas (SERNAGEOMIN, 2018).

Al respecto, las medidas de gestión de la estabilidad química se encaminan a prevenir y/o controlar la generación de drenajes, evitando y/o limitando la interacción entre los factores involucrados en los procesos (Fundación Chile, 2018). En ese sentido, las tecnologías emergentes para la construcción de depósitos de relaves, como la depositación de pastas de relaves o relaves espesados, apuntan a disminuir la probabilidad de infiltraciones y, a la vez, obtener mayor eficiencia en la reutilización del agua.

A pesar de estos esfuerzos, si la gestión de estabilidad química se focaliza en evitar la formación de drenaje ácido como único fin, se está omitiendo la posibilidad de que sustancias potencialmente peligrosas, pero “estables químicamente”, puedan entrar en contacto con el ambiente y causar contaminación. Lo anterior difiere con el enfoque en algunos países donde, además de buscar evitar la formación de ácidos, se pretende prevenir la migración de elementos peligrosos; los que pueden movilizarse con la acidificación, pero también migrar en forma de polvo (SERNAGEOMIN, 2018).

### **5.2.2. Contaminación atmosférica**

Debido al tamaño de sus partículas, los relaves pueden ser dispersados directamente desde la superficie del depósito por la acción erosiva del viento. El aire puede contaminarse con impurezas sólidas, como lo son el polvo y el material particulado más fino, que posee el potencial de afectar el sistema respiratorio de la población cercana (SERNAGEOMIN, 2018).

Al respecto, cabe destacar que los relaves se concentran casi en su totalidad en las zonas más áridas del norte de Chile, lo cual tiene implicancias en la circulación del viento y la posterior acumulación del material trasladado. Debido a la ausencia de vegetación, las corrientes de viento pueden trasladarse sin interrupciones hasta alcanzar las ciudades, en donde poco a poco se acumulan partículas finas que contienen diferentes metales contaminantes, fenómeno que se presenta con mayor fuerza en depósitos abandonados o en proceso de desecación (Medvinsky y otros, 2015).

### **5.2.3. Contaminación de suelos**

En caso de no existir control adecuado, la superficie terrestre puede entrar en contacto con los componentes del relave por la infiltración de fluidos y/o erosión y transporte del material más fino a través del aire. Ello podría implicar la ocurrencia de fenómenos como la acidificación y/o acumulación de metales pesados (SERNAGEOMIN, 2018), lo cual provoca cambios en las características del suelo y trae consigo a la vez, una disminución de la calidad y efectos negativos en las plantas y ecosistemas cercanos (Hauser, 2000).

Lamentablemente en Chile existen estándares de calidad para el aire y el agua, sin embargo, para la matriz suelo no hay actualmente normas que regulen la concentración de sustancias tóxicas o potencialmente dañinas. Dado lo anterior, al no existir un límite o rango establecido para la

presencia de sustancias contaminantes, no es posible referirse legalmente a “contaminación del suelo” (SERNAGEOMIN, 2018).

### **5.3. FALLAS ESTRUCTURALES Y GEOTECNIA**

En Chile existen varios casos de desastres originados por fallas de estas estructuras. Quizás el más emblemático y determinante, fue el colapso de los tranques de relaves de la mina El Soldado en 1965. Luego de un terremoto que ocurrió en la Región de Valparaíso, dos de los tres tranques de esta mina, cedieron originando una avalancha de líquidos tóxicos que sepultó casi en su totalidad al poblado minero El Cobre, que se encontraba al pie del mayor de los tranques. Más de 200 personas murieron y cientos de kilómetros de terrenos fueron contaminados con el material derramado (Dobry, 1965; Medvinsky y otros, 2015). Cabe destacar que los depósitos afectados no contaban con las mínimas normas de seguridad que se aplican actualmente.

Cinco años después de esta tragedia se empiezan a precisar las exigencias tecnológicas en la construcción de los depósitos de relaves y, en 2006, entra en vigencia el Decreto Supremo N° 248, que tiene por objeto precisar las exigencias técnicas para la construcción de estas obras, considerando la protección de la salud y seguridad de las personas y del ambiente.

Si bien la seguridad de los depósitos de relaves ha mejorado con las normativas reguladoras, es significativo que aún sigan ocurriendo colapsos y que la mayoría de los fallos hayan tenido como detonante algún fenómeno natural, ya sea geológico y/o meteorológico. Un ejemplo reciente es el de un tranque de la mina abandonada Las Palmas, en la comuna de Penciahue (Región del Maule), que se desmoronó durante el terremoto del 2010 y sepultó una casa en las cercanías, matando a toda la familia que habitaba allí (Medvinsky y otros, 2015). Otros cuatro depósitos registraron problemas asociados a inestabilidad de taludes y debilidades de compactación producto del sismo.

En 2015, después de los aluviones e inundaciones que afectaron al norte del país, 10 depósitos de tranques de pequeñas dimensiones resultaron con daños menores. Sobre este suceso, Medvinsky y otros (2015) aseguran que el colapso parcial de tales relaves y otras fuentes, habrían causado en los ciudadanos picazón en el cuerpo y ardor de los ojos por días. En contraposición, estudios indican que los depósitos afectados no aportaron con material a los aluviones (Falcón y Herrera, 2018).

En total, se reportan cerca de 50 casos de fallas de inestabilidad mecánica desde 1901 a la actualidad en Chile (Falcón y Herrera, 2018; Villavicencio y otros, 2013). De ellas, todas las que

ocasionaron desastres han ocurrido en tranques de relaves, que corresponden a un tipo específico de depósito. Adicionalmente, casi la totalidad de estos contemplan otra condición común, que es el método constructivo de aguas arriba, antiguamente utilizado y que consiste en un muro inicial construido con material de empréstito compactado, sobre el cual se inicia el depósito de los relaves. Una vez que el contenedor se encuentra próximo a llenarse, se procede al levante del muro en dirección hacia aguas arriba y comienza una nueva etapa de descarga de relaves (SERNAGEOMIN, 2007).

En la actualidad, la norma chilena prohíbe este método en particular por ser uno de los más peligrosos y con mayor susceptibilidad a sufrir derrumbes. Sin ir más lejos, casi la totalidad de accidentes y derrumbes de tranques de relaves en el mundo, han ocurrido en tranques construidos con el método aguas arriba (SERNAGEOMIN, 2018).

Actualmente existen otras formas en que se almacenan los relaves, donde la más conveniente dependerá de la cercanía al concentrador, el nivel de producción de la planta de beneficio y la topografía del lugar, entre otros factores (Tabla 5). Los tranques de relaves siguen siendo utilizados, pero construidos con otros métodos más seguros, con el fin de reducir los riesgos de inestabilidad física asociados.

**Tabla 5: Tipos de depósitos de relaves según forma de almacenamiento.**

	<b>Tranque de relaves</b>	<b>Embalse de relaves</b>	<b>Depósito espesado</b>	<b>Depósito filtrado</b>	<b>Depósito de relaves en pasta</b>
<i>Características</i>	Muro de contención construido con la fracción más gruesa del relave	Muro de contención construido con material de empréstito	Proceso previo de extracción de agua y sedimentación Concentración de sólidos con valores entre 65 a 75%	Humedad menor de 20%.	Situación intermedia entre espesados y filtrados
<i>Ventajas</i>	Económico	Sencillo	Eficaz, menores riesgos geotécnicos	Eficaz, menores riesgos geotécnicos	Eficaz, menores riesgos geotécnicos
<i>Desventajas</i>	Presenta riesgos geotécnicos	Más costoso que tranque, también presenta riesgos	Algunos riesgos geotécnicos como <i>overtopping</i> (derrames)	Costoso	Costoso

Parcialmente debido al gran tamaño que pueden alcanzar y la variabilidad en las condiciones de fundación, los depósitos de relaves de relleno hidráulico instalados en zonas planas

tienden a ser más propensos a fallas que aquellos instalados rellenando depresiones (Blight, 1997), por lo que usar este tipo de depósito en un terreno plano como Hijuela 10 no supondría, preliminarmente, la mejor opción. Aunque esta susceptibilidad disminuye en un clima semiárido donde la superficie del suelo se encuentra seca (Blight, 1997) y en un terreno con características litológicas homogéneas.

Otro factor de riesgo de falla estructural, además del método de construcción, es el estado de actividad de estas estructuras. Según información del SERNAGEOMIN, el último catastro de abril de 2019 consideraba un total de 742 depósitos de relaves. De ellos, 463 están calificados como inactivos y 173 como abandonados; constituyendo los denominados “pasivos ambientales mineros”. Estos pasivos suponen la mayor amenaza en cuanto a sus condiciones de estabilidad física y química al no haber contado con una gestión ambiental óptima durante su vida útil y no haber sido cerrados con un adecuado plan.

De los 742 depósitos identificados, 603 corresponden a tranques de relaves. Del total de estos, 557 son pasivos ambientales mineros, y de ellos, 210 están contruidos con el método de aguas arriba; una cifra que podría ser superior, ya que 256 tranques de relaves no especifican su método constructivo.

Ahora, de los 104 depósitos de relaves activos, 46 corresponden a tranques de relave, 42 a embalses y el resto a otro tipo de instalaciones. Esta equivalencia entre tranques y embalses indica que los primeros comienzan a ser menos utilizados y, el número relativamente creciente de otras técnicas, sugiere que las normas ambientales han llevado a la implementación de mayor tecnología.

A los relaves espesados, por ejemplo, se les remueve gran parte del agua mediante el uso de espesadores para obtener una pulpa con una concentración de sólidos con valores entre 65 a 75%, otorgándole un estado geotécnico denso, no licuable y sísmicamente estable. Es un sistema que no requiere de un dique o muro contenedor para su construcción, además de minimizar el espacio requerido para depositar el material.

Sin embargo, las fallas no solo provienen de problemas estructurales. Entre otros factores que afectan la estabilidad están las condiciones de emplazamiento, donde figuran el clima y factores geológicos, como características del suelo de fundación y la ocurrencia de peligros geológicos. Todos estos agentes o intervenciones de tipo natural (lluvia, viento, sismos y remociones en masa) son eventos gatilladores capaces de provocar fallas.

Si bien en Chile las fallas catastróficas han sido causadas mayoritariamente por sismos de gran magnitud ( $M_w > 6$ ), afectando a tranques vulnerables, la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos también podría provocar varios tipos de fallas que terminen en el derrame del contenido del depósito, con la potencial contaminación que esto implica. Así ocurrió en 2016 en quebrada La Marquesa, cerca de La Serena, donde el agua arrastró el pie de los muros de un tranque de relaves y fue transportado por dicha quebrada. Hecho confirmado tiempo después al analizar muestras de sedimentos, los cuales resultaron tener el color y textura de un relave típico (Falcón y Herrera, 2018). Además, entre los 10 depósitos de relaves de pequeñas dimensiones que resultaron dañados debido a los aluviones de 2015, uno de ellos se localiza en Vallenar y estaba activo, al menos, cuando ocurrió el accidente (Falcón y otros, 2017). Se desconocen los detalles acerca de la falla provocada por este suceso, la ubicación exacta del depósito y su estado de actividad actual.

#### **5.4. IMPACTO SOCIOAMBIENTAL**

Todos los casos anteriormente mencionados demuestran que la gestión de los depósitos de relaves es imprescindible, sobre todo, cuando estos se encuentran cerca de sitios poblados. En general, existe un rechazo social hacia los proyectos de depósitos de relaves, debido a la preocupación infundida en torno a los potenciales efectos negativos en las personas y el ecosistema en el caso de algún tipo de inestabilidad física o química. Es más, en muchas de estas estructuras ya existe algún tipo de conflicto con las comunidades; por lo que las empresas mineras no solo deben hacer frente a los retos técnicos relacionados con el diseño, construcción, operación, cierre y postcierre de sus depósitos, sino también a aquellos manifestados desde el entorno (Fundación Chile, 2018).

Según reportes de sustentabilidad de ENAMI (2017), el proyecto en el que se enmarca esta Memoria de Título considera previamente la construcción de un depósito de relaves al interior de la planta Vallenar que operaría durante 9 años, dando la holgura de tiempo necesaria para la construcción de la estructura en Hijuela 10, lo cual implica que la disposición de relaves en planta Vallenar es a largo plazo y, aunque no se tenga información sobre el periodo de vida útil, este debe exceder los 9 años del otro depósito.

Por consiguiente, para prevenir fallas en la futura estructura, las técnicas utilizadas deben asegurar que, ante la ocurrencia de algún evento gatillador de inestabilidad, el depósito reaccione

de manera óptima tanto durante toda su vida útil como en la etapa posterior, cuando las operaciones mineras hayan cesado, ya que estos depósitos son permanentes. En relación a esto, el tipo de instalación elegida en la zona y la frecuencia de los peligros geológicos son aspectos que debieran ser considerados desde la etapa de diseño.

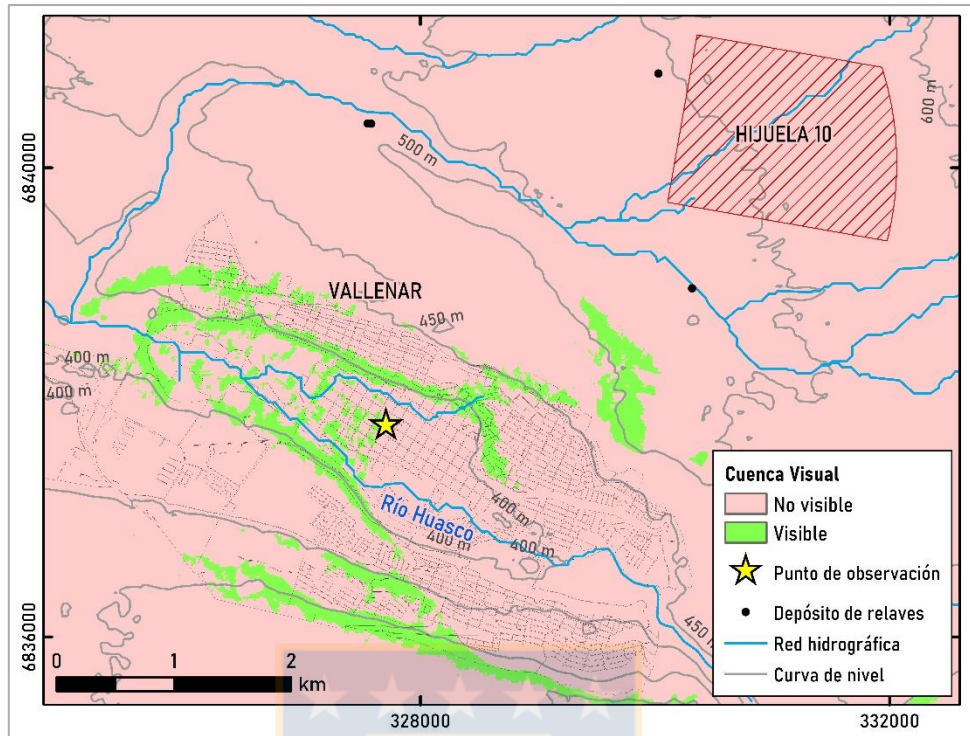
Otra de las problemáticas más controversiales en torno a este tipo de proyectos se relaciona con su presencia en sitios poblados. En la ciudad de Vallenar, específicamente, existen 5 depósitos a escasa distancia, por lo que agregar uno aún más cercano podría ser fuente de preocupación debido la alta densidad preexistente.

Además, es importante considerar que, en caso que el futuro concentrador constituyera una potencial fuente de contaminación, la distancia entre este y Vallenar sería solo de 2,5 km aproximadamente. Las principales sustancias tóxicas asociadas a depósitos de relaves de cobre son As, Pb, Mo, entre otros, pero se necesitan estudios más detallados para determinar específicamente los elementos del material de abastecimiento en la planta de Vallenar.

La cercanía de los depósitos de relaves a los centros poblados no solo implica potencial contaminación y daños en la salud de las personas, sino también puede significar el uso de territorios con valor patrimonial, cultural, etc. y daños paisajísticos. Sobre esto último, por la localización de Hijuela 10 y las características geomorfológicas del sector, el proyecto no afectaría el paisaje de la ciudad de Vallenar (Figura 9).

Por último, si bien la información indica que existen más agentes o eventos responsables de fallas, pocas de estas han ocurrido por causas no sísmicas en Chile y las consecuencias de las cuales se tiene información han sido impactos ambientales limitados. Por lo tanto, se puede afirmar que actualmente los depósitos de relaves en Chile no son obras tan vulnerables ante fenómenos no sísmicos.





**Figura 9: Modelo de cuenca visual de Vallenar.** Las áreas verdes representan las zonas visibles desde el plano de la ciudad de Vallenar (punto de observación), mientras que las de color rosado no son apreciadas desde dicho punto de referencia. Cabe destacar que, ni en las zonas más altas de la ciudad, Hijuela 10 es observado.



## **6. PELIGROS GEOLÓGICOS**

### **6.1. CONCEPTOS BÁSICOS**

Peligro geológico es cualquier tipo de movimiento sobre la superficie, originado por un proceso geodinámico, y que tenga potencial para afectar a las personas o bienes. Estos movimientos, además de ser el reflejo del medio geológico, también pueden ser provocados o desencadenados por el hombre al interferir con la naturaleza y modificar sus condiciones (González de Vallejo, 2002). Cada peligro es caracterizado por su ubicación, intensidad o magnitud y probabilidad.

Por otra parte, la peligrosidad se define como la probabilidad de ocurrencia de un proceso geológico de un nivel de intensidad determinado, dentro de un periodo de tiempo dado y de un área específica. Hace referencia a la frecuencia de estos procesos y al lugar (Barbat, 1998).

Para su evaluación es necesario conocer dónde y cuándo ocurrieron los procesos en el pasado, la intensidad y magnitud que tuvieron, las zonas en que pueden ocurrir procesos futuros y la frecuencia en que ocurren (González de Vallejo y otros, 2002). De acuerdo a lo anterior, resulta primordial identificar y caracterizar los peligros geológicos locales para llevar a cabo un estudio geotécnico.

En el área de estudio, los peligros que tienen potencial de ocurrencia son los sismos y los procesos de remoción en masa. Mientras que, el peligro volcánico es descartado, ya que en gran parte de la Región de Atacama no existen volcanes activos, por lo que el riesgo asociado a este tipo de eventos en la zona de estudio es prácticamente nulo.

Un peligro geológico debiera contener al menos información sobre el potencial de ocurrencia, ya sea expresado cuantitativamente, en términos de frecuencia o probabilidad, o bien, expresado cualitativamente en términos de posibilidad (alta, media o baja).

### **6.2. PELIGRO SÍSMICO**

En el área de estudio, y buena parte de Chile Continental (entre los 18-47°S), la sismicidad es originada principalmente debido a la rápida subducción de la Placa de Nazca bajo la Placa Sudamericana, cuya velocidad se estima entre 6 y 7 cm/año (Khazaradze y Klotz, 2003 en Leyton y otros, 2009). Por este motivo, el riesgo sísmico asociado a terremotos de subducción (interplaca) es inherente al territorio nacional, por su ubicación geográfica y las condiciones tectónicas a las que está sometido.

En la Tabla 6 se presenta un registro de los principales eventos sísmicos desde principios del siglo XX, con magnitud mayor de 6,0 ( $M_w$ ) en las regiones de Atacama y Coquimbo. Estos datos han sido extraídos del catálogo de actividad sísmica compilado por el Centro Nacional de Información sobre Terremotos dependiente del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés).

**Tabla 6: Principales eventos sísmicos históricos, magnitud  $M_w > 6,0$ .**  
Destaca un evento de 1922 que causó gran destrucción.

Año	Distancia a Vallenar	$M_w$	Profundidad
1922	131 km al WNW	7,0	25 km
1922	95 km al ENE	8,5	70 km
1923	65 km al SW	6,5	35 km
1924	40 km al N	6,7	45 km
1927	30 km al W	6,5	35 km
1939	155 km al NNW	7,4	35 km
1940	30 km al NW	6,5	45 km
1964	90 km al NNW	6,5	30 km
1987	50 km al N	6,5	37 km
1995	60 km al SW	6,7	20 km
1998	135 km al SW	6,7	27 km
2011	80 km al N	6,1	20 km
2012	60 km al SW	6,1	63 km
2013	60 km al N	6,8	45 km

Los sismos tienen focos principalmente costeros y profundidades entre 20 y 45 km, lo cual es típico de terremotos de subducción, aunque también hay hipocentros que superan los 60 km. Entre ellos destaca el terremoto de Vallenar de 1922 (Bobillier, 1926), un evento de gran magnitud ( $M_w=8,5$ ), cuyo epicentro se estima a 95 km al noreste de dicha ciudad y del área de estudio, aproximadamente. Cabe destacar que la zona en que ocurrió el terremoto de 1922 no ha vuelto a tener actividad sísmica de tal magnitud desde esa fecha, constituyéndose en la actualidad como una laguna o *gap* sísmico.

Por otro lado, la falta de evidencia de depósitos cuaternarios deformados por estructuras geológicas entre los  $28^{\circ}$ - $29^{\circ}$ S y los  $70^{\circ}30'$ - $71^{\circ}$ W (Áreas Carrizal Bajo-Chacritas y Vallenar-Domeyko) sugiere la inexistencia de fallas activas que propicien la ocurrencia de terremotos de intraplaca y que puedan afectar la integridad de las obras que se proyectan en el área Hijuela 10.

De esta manera, la única fuente sismogénica reconocida de eventos perceptibles (mediana a alta intensidad) corresponde a la zona interplaca.

### 6.2.1. Estimación del peligro sísmico

De acuerdo a los antecedentes disponibles, es altamente posible que, durante la vida útil del proyecto, ocurran sismos de profundidad intermedia (30-70 km) de considerable magnitud ( $M_w > 6,0$ ) asociados a la zona interplaca y que sean perceptibles en el sitio Hijuela 10. Adicionalmente, ya que las zonas más probables de generación son aquellas que no han experimentado grandes sismos en varias décadas (teniendo antecedentes de este tipo de eventos) (McCann y otros, 1979), se puede deducir que el área de Vallenar tiene alta probabilidad de ser afectada por futuros terremotos, pues ha transcurrido suficiente tiempo (casi 100 años) para acumular esfuerzos desde el último gran terremoto.

Por cierto, debido a que un terremoto no se puede evitar ni se previene en el tiempo, las obras con cierto grado de exposición deben adoptar medidas de mitigación y protección para reducir su vulnerabilidad. Para ello, la norma sísmica chilena (NCh433) establece requisitos mínimos para el diseño sísmico de estructuras de acuerdo al área en que serán construidos y al uso que se dará.

Respecto al primer factor, existe una zonificación sísmica que define el valor del coeficiente de aceleración sísmica a considerar para el diseño de obras. Hijuela 10 se encuentra emplazada en la denominada "Zona 3", que incluye toda la costa y, de acuerdo a lo definido, presenta los suelos más blandos, con los valores de aceleración sísmica más altos del territorio nacional, lo que obliga a una mayor rigidez en sus cimientos. El valor asignado para la aceleración sísmica efectiva para la "Zona 3" es de  $A_0 = 0,40$  g. Estos datos, sin embargo, son solo referenciales y deben ser necesariamente confirmados mediante un estudio de riesgo sísmico, donde se determinarán los coeficientes de aceleración específicos que se utilizarán para los diseños en las siguientes fases de ingeniería del proyecto.

Los diseños también se basan en los tipos de suelos definidos en la norma, pero tal clasificación exige realizar sondeos, ensayos *in situ* y de laboratorio como los de penetración estándar y de compresión simple, además de métodos sísmicos.

### 6.3. REMOCIONES EN MASA

Remoción en masa es el término genérico para describir una amplia gama de procesos gravitacionales de movilización lenta o rápida de cierto volumen de suelo, sedimento (detritos) y/o roca, producidos por una serie de factores que modifican las condiciones físicas preexistentes de

los materiales afectados. Consecuentemente provocan cambios en el paisaje, desde desplazamientos de pocos centímetros al año hasta un severo deterioro en el relieve comprometido (Hauser, 2000).

Existe diversidad de procesos de ocurrencia común en Chile, los cuales se diferencian por la velocidad y mecanismo de desplazamiento, contenido de agua, materiales y ambientes comprometidos, entre otros factores.

Si bien corresponden a fenómenos naturales, estos movimientos pueden tener efectos directos e indirectos en las actividades humanas y una connotación catastrófica cuando vidas humanas, bienes, propiedades y servicios expuestos a ellos resultan dañados.

La forma más aceptada y conocida de clasificación utiliza como criterios el tipo de movimiento y el tipo de material involucrados (Varnes, 1978). El tipo de movimiento describe el mecanismo interno por el cual la remoción en masa es desplazada: caídas o desprendimientos, deslizamientos, flujos, vuelcos y extensiones laterales (Highland y Bobrowsky, 2008). En la Tabla 6 se describen los tipos de remociones en masa más comunes.

**Tabla 7: Clasificación de remociones en masa según Varnes (1978).**

Tipo de movimiento		Tipo de material		
		Roca	Suelo	
			Grano grueso	Grano fino
<b>Caída</b>		Caída de rocas	Caída de detritos	Caída de tierra
<b>Vuelcos</b>		Vuelco de rocas	Vuelco de detritos	Vuelco de tierra
<b>Deslizamiento</b>	<b>Rotacional</b>	Deslizamiento de roca	Deslizamiento de detritos	Deslizamiento de tierra
	<b>Traslacional</b>			
<b>Extensiones laterales</b>		Extensión de roca	Extensión de detritos	Extensión de tierra
<b>Flujos</b>		<i>Creep</i>	Flujo de detritos	Flujo de tierra
<b>Complejos</b> (Combinación de dos o más tipos de movimientos)				

El movimiento puede ocurrir por una combinación de causas, desde geológicas, físicas a antrópicas, que gradualmente lleven a una condición inestable, o bien, necesitan un estímulo externo para ser gatillados (Wieczorek, 1996). Las causas son los llamados factores condicionantes y los estímulos externos, los agentes desencadenantes.

### **6.3.1. Factores condicionantes**

Los factores condicionantes corresponden a variables que influyen y determinan condiciones de inestabilidad para el desarrollo de remociones en masa en una ladera o unidad geológica o geomorfológica específica (Hauser, 2000). Cabe destacar que distintos factores actúan de variadas maneras y grados en cada uno de los diferentes procesos.

A continuación, se describen los factores condicionantes agrupados en categorías de acuerdo a Sepúlveda (1998 en Lara, 2007).

#### **6.3.1.1. Geología y geotecnia**

Entre los factores de esta categoría se cuentan la litología de las rocas, su estructura, alteración y/o meteorización; y en el caso de los suelos o depósitos no consolidados, adquiere relevancia el tipo de depósito, composición, granulometría y sus propiedades geotécnicas.

En ambos casos, la composición y estado de alteración de los materiales determinan las propiedades de resistencia y su estabilidad en laderas. En el área de estudio, tanto rocas como depósitos no consolidados se encuentran escasamente meteorizados, por lo que es presumible una baja presencia de minerales secundarios del grupo de las arcillas, los cuales influyen de manera relevante en la pérdida de resistencia.

Las fracturas condicionan la inestabilidad de las rocas y hacen una zona proclive a procesos de remoción, ya sea por sismos o por precipitaciones. Si bien en este trabajo no se realizó una búsqueda de posibles estructuras fuera de los límites de Hijuela 10, la información bibliográfica disponible no señala existencia de fallas activas, ni un considerable fracturamiento ocasionado por fallas inactivas o diaclasado en las rocas.

En suelos, la granulometría y densidad del material son relevantes al incidir en su grado de compactación, mientras que la plasticidad y humedad influirán directamente en su cohesión. La permeabilidad lo hará en la distribución del flujo de las aguas subterráneas y superficiales y, por ende, en el grado de saturación del suelo, donde una saturación del 100% representa la condición más favorable para los deslizamientos y flujos (Lara, 2007). En ese sentido, los depósitos aluviales y coluviales (considerados materiales con elevada permeabilidad) serán susceptibles de ser movilizados o removilizados si superan su capacidad de infiltración y se produce una saturación rápida (Hauser, 2000).

### **6.3.1.2. Geomorfología**

En este factor se incluyen todos los atributos morfológicos del terreno comprometido en una remoción en masa, tales como topografía, pendiente, forma de las hoyas hidrográficas y orientación de laderas. Estas características inciden principalmente en la energía y el tipo de movimiento producidos.

Un relieve escarpado y pendientes abruptas están entre los factores principales para que se produzcan deslizamientos y flujos, pues en general, estos movimientos necesitan laderas con alta inclinación. Los deslizamientos se asocian a pendientes entre 20-40° (Highland y Bobrowsky, 2008) y para el desarrollo de flujos se consideran favorables los territorios con pendientes mayores a 25° en las cabeceras de las hoyas hidrográficas (Hauser, 2000). A pesar de lo anterior, algunas remociones en masa podrían ocurrir sobre superficies con inclinaciones que rondan los 10°-16,7° (González, A., comunicación personal, 2020).

Adicionalmente, la forma del relieve tiene particular influencia en los flujos, que habitualmente se limitan a las dimensiones de barrancos escarpados y mantienen al fluido canalizado (Highland y Bobrowsky, 2008).

### **6.3.1.3. Hidrología e hidrogeología**

Las redes de drenaje, posiciones del nivel freático y coeficientes de escorrentía influyen en las condiciones de saturación del terreno. La presencia de agua en medios porosos aumenta los esfuerzos de corte por el incremento del peso del terreno y origina presiones intersticiales, lo que reduce la resistencia. En roca, el agua puede contribuir a la pérdida de resistencia al infiltrarse en las estructuras, ejerciendo tensiones en estas estructuras que se oponen a las tensiones que la mantienen estable.

### **6.3.1.4. Vegetación**

En general, la vegetación se trata como un factor que contribuye con la estabilización de laderas y taludes, no obstante, la estabilidad dada por este elemento está fuertemente condicionada por el efecto del clima y la topografía.

Según Selby (1993) en Lara (2007), la vegetación contribuiría a disminuir tanto la erosión de las laderas y como el grado de saturación del suelo mediante la absorción de agua. Además, sus



raíces en general ayudarían a la estabilización de las laderas actuando como anclajes de reforzamiento, sin dejar de considerar que en algunos casos esta estabilización es solo superficial.

En la zona de estudio la vegetación es bastante escasa, existiendo solo pequeños arbustos y cactáceas localizados preferentemente al interior de las líneas de drenaje, lo cual no sería suficiente para contribuir a la estabilización.

#### **6.3.1.5. Clima**

El clima condiciona, con su régimen de precipitaciones, temperatura y humedad, el ambiente geológico, lo que influye en la estabilidad de los macizos rocos y suelos; además de hacer más probables ciertos tipos de remociones que otros. Por ello, en zonas húmedas predominan los deslizamientos, mientras que en zonas secas con menores precipitaciones y suelos desnudos o con escasa vegetación, predominan los flujos de detritos (Sepúlveda y otros, 2016), que suelen ser ocasionados por descargas de agua inusualmente altas.

#### **6.3.1.6. Actividad antrópica**

El control que ejerce el factor antrópico sobre la estabilidad de laderas es muchas veces primordial para la ocurrencia de eventos de remoción en masa (Lara, 2007), ya que puede dar lugar a laderas más inestables producto de diseños mal concebidos y la disminución artificial de la resistencia de los materiales. Sin embargo, también existen obras antrópicas creadas para disminuir la susceptibilidad de remociones en masa.

El terreno de Hijuela 10 se encuentra en un sitio llano poco intervenido y con escasa población, por lo que la actividad antrópica no ejerce un rol de consideración.

#### **6.3.2. Agentes desencadenantes**

Un agente desencadenante es un factor externo que funciona como activador de remociones en masa mediante el rápido incremento de esfuerzos o la reducción de la resistencia del material de una ladera (Wieczorek, 1996). Entre los agentes más comunes se cuentan principalmente las lluvias de gran intensidad y los sismos; secundariamente las erupciones volcánicas, la fusión de nieve, la intervención antrópica, entre otros.

### **6.3.2.1. Sismos**

Los sismos son agentes desencadenantes de remociones en masa en diversos escenarios geológicos y topográficos que involucren rocas o suelo disgregados (Wieczorek, 1996). El efecto que tienen en el mecanismo, velocidad e intensidad del movimiento depende de la magnitud del sismo, de las condiciones geológicas locales y la distancia entre el foco de la remoción en masa y el epicentro del sismo.

### **6.3.2.2. Precipitaciones**

Las precipitaciones que comúnmente desencadenan remociones en masa son las intensas registradas en algunas horas o aquellas más moderadas que duran varios días. No obstante, se debe tener en consideración que los umbrales de precipitaciones necesarios para desencadenar estos fenómenos dependen de condiciones geológicas, geomorfológicas y climáticas locales (Wieczorek, 1996). Los suelos poco competentes o sueltos son particularmente proclives a deslizamientos gatillados por lluvias, ya que se saturan más rápido; y en regiones áridas, particularmente, las lluvias intensas pueden dar origen a flujos incluso en suelos sueltos de poco espesor.

Estadísticamente los datos muestran que en Chile las lluvias corresponden al principal factor detonante de remociones en masa (Espinoza y otros, 1985) y lideran además cuando se trata de víctimas fatales producto de estos procesos, que se concentran especialmente en otoño (Marín y otros, 2018).

En el área de estudio, las precipitaciones también serían el principal factor detonante de estos fenómenos. Ellas, dependiendo de su intensidad y persistencia, podrían causar flujos canalizados si el escurrimiento superficial es suficiente, aunque la ocurrencia de estos últimos necesita material suelto disponible, por ejemplo, de deslizamientos previos.

## **7. EVALUACIÓN DE AMENAZA POR REMOCIONES EN MASA**

Un proceso geológico constituye un riesgo cuando afecta, de una forma directa o indirecta, a las actividades humanas. Este riesgo se evalúa a partir de la peligrosidad de dicho proceso y de los efectos del mismo sobre los elementos expuestos al peligro, lo cuales pueden ser expresados por diferentes parámetros (González de Vallejo y otros, 2002).

Uno de esos parámetros corresponde a la vulnerabilidad o grado de daños o pérdidas potenciales en un elemento o conjunto de ellos. Esta depende de las características del elemento considerado (diseño de la estructura), de la densidad de la población, de los sistemas de monitoreo, fiscalización de estructuras, planes de emergencia y evacuación y de la intensidad del fenómeno. La mitigación consiste en reducir dicha vulnerabilidad mediante el control del proceso y/o la protección de los elementos expuestos (González de Vallejo y otros, 2002).

En el escenario ideal, para el manejo del riesgo, primero se debiera optar por tomar medidas de mitigación no estructurales, que se basan en la ordenación del uso del territorio, para lo cual es necesario el conocimiento de los procesos que pueden afectar a un área. No obstante, su aplicación resulta compleja en áreas que han sido ya desarrolladas y aún más en un contexto de políticas reacias a la adopción de medidas restrictivas (González de Vallejo, 2002). En ese contexto, las disposiciones actuales para la mitigación de los daños potenciales apuntan a reducir estructuralmente la vulnerabilidad de los elementos expuestos, aunque sin dejar de lado el estudio del territorio para distinguir zonas seguras de aquellas más peligrosas. Para esta tarea, es necesario realizar mapas de peligrosidad y/o susceptibilidad.

Conociendo el gran historial de eventos aluviales ocurridos en la zona norte del país, se decide analizar con mayor detalle los procesos de remoción en masa para determinar si estos podrían afectar las obras que se pretende construir.

### **7.1. PROCESOS GEOLÓGICOS Y PROBLEMAS GEOTÉCNICOS**

Los factores geológicos son condicionantes de todo proyecto expuesto a ellos. Para empezar, están todos aquellos factores de los materiales geológicos cuya presencia condicione técnicamente la obra, tales como composición y fábrica. Luego están los procesos geológicos, que pueden modificar el comportamiento de los materiales, generando cambios morfológicos en el medio físico y ocasionando problemas geotécnicos. Es decir, la incidencia de peligros geológicos puede afectar a la seguridad o la viabilidad de un proyecto. No obstante, el efecto concreto que

tiene la ocurrencia de peligros geológicos sobre la estabilidad y seguridad de un depósito de relaves dependerá del grado de exposición y vulnerabilidad de la obra y de las características de dicho peligro.

La Región de Atacama, donde se ubica el área de estudio, destaca porque históricamente ha sido afectada por numerosos eventos de remoción en masa. Específicamente, son los procesos de flujo los que constituyen la mayor amenaza, pues todas las muertes catastradas por remociones en la región (132 víctimas) están vinculadas a aluviones (Marín y otros, 2018).

Cabe destacar que los flujos, además, son el tipo de mecanismo que ha cobrado más vidas a nivel país (425) y la Región de Atacama es la que presenta más víctimas fatales producto de estos eventos (Marín y otros, 2018). Curiosamente, el *ranking* de víctimas fatales por remociones en masa no es liderado por esta región, sino por la de Valparaíso (246), seguida por la Región de O'Higgins (158); aunque esta situación se ve fuertemente condicionada por dos eventos en particular, que corresponden a los colapsos de relaves ocurridos en mina El Soldado y mina Sewell, regiones de Valparaíso y de O'Higgins, respectivamente (Marín y otros, 2018).

Los colapsos de depósitos de relaves suelen ser considerados como un tipo de proceso de remoción en masa, aunque el flujo sea inducido por factores antrópicos y naturales en una estructura artificial. Una vez ocurrida la ruptura de esta, el material acumulado puede desplazarse como un flujo de gran energía y resistencia, lo cual lo hace muy destructivo. Es preciso, además, señalar que ambos acontecimientos mencionados anteriormente fueron desencadenados por sismos, lo cual comprueba la influencia de los peligros geológicos en la ingeniería y el entorno natural. Es por ello que se evalúa la amenaza asociada a estos fenómenos. Para determinar si los posibles peligros pueden ser manejados con diseños de ingeniería adecuados, o bien, si restringirá la ocupación del área Hijuela 10. Las remociones en masa, por ejemplo, son eventos esporádicos cuya probabilidad de ocurrencia, intensidad o magnitud determinarán en mayor grado la factibilidad de un proyecto.

La forma en que pueden abordarse los estudios de movimientos en masa es variada y dependerá de la escala de trabajo y los aspectos a considerar. De acuerdo con el tipo de caso se podrán realizar análisis para determinar factores de seguridad, curvas de magnitud versus frecuencia, mapas de susceptibilidad a movimientos en masa, mapas de intensidad de amenazas, zonas de amenazas y retiros (SERNAGEOMIN, 2007).

De todas formas, el comportamiento del depósito de relaves ante la ocurrencia de un peligro geológico dependerá también de la obra de ingeniería y de las características del material, principalmente del tipo de partículas sólidas y de la razón agua/sólidos, que va del orden de 1:1 a 2:1. Así, una masa de relaves con alto contenido de agua escurrirá fácilmente, incluso con pendientes pequeñas. Por ello, para conseguir estructuras estables con los relaves, deben determinarse sus características, de manera similar a lo que se hace con los suelos (Ramírez, 2007).

## 7.2. SUSCEPTIBILIDAD A REMOCIONES EN MASA

Este concepto, según González de Vallejo y otros (2002), se define como la posibilidad de que una zona quede afectada por un determinado fenómeno de estas características. Los mapas que representan esto se pueden utilizar para controlar el desarrollo de un área, evitar la construcción directa sobre las zonas potencialmente inestables, o como indicadores de zonas de inestabilidad y crear zonas de amenaza pendiente abajo (SERNAGEOMIN, 2007), por esta razón se estima conveniente analizar la susceptibilidad a remociones en masa dentro del terreno Hijuela 10.

Las metodologías usadas para obtener los resultados pueden ser cualitativas, semicuantitativas y cuantitativas. En la Tabla 8 se presenta un cuadro resumen de tipos y técnicas de análisis de mapas de susceptibilidad.

**Tabla 8: Tipos de análisis para la zonificación de la susceptibilidad a movimientos en masa.** Según Soeters y Van Westen (1996 en SERNAGEOMIN, 2007).

<i>Tipo</i>	<i>Base metodológica</i>	<i>Técnicas</i>	<i>Detalles</i>
Inventario	Registro de ocurrencia de movimientos en masa	Análisis de distribución, actividad y densidad	Permite hacer análisis de eventos ocurridos en cierto período de tiempo
Heurístico	Conocimiento de un sitio por fotointerpretación o trabajo de campo	Análisis geomorfológico	Recomendado para toda escala de trabajo. Muy subjetivo
		Ponderación de parámetros	Apto para escalas media y regional. Subjetivo.
Estadístico	Correlaciones entre mapa inventario y parámetros de predicción	Análisis bivariado	Correlación bivariada entre los parámetros de predicción y densidad del movimiento
		Análisis multivariado	Correlación entre un grupo de variables de predicción y densidad del movimiento
Determinístico	Modelos numéricos	Análisis de talud infinito	Necesita escala muy detallada

Entre los métodos heurísticos figuran los mapas mediante ponderación de parámetros. En este tipo de análisis se asignan valores dentro de un rango a los parámetros de predicción y luego

se combinan utilizando un algoritmo diseñado al respecto, para obtener la susceptibilidad asociada a cierta unidad geológica o geomorfológica. El problema con este sistema es que los resultados serán dados por los valores asignados por quien realiza el trabajo, lo cual otorga subjetividad. A pesar de ello, métodos más avanzados, como el estadístico multivariado, son rara vez usados debido a que su puesta en práctica es difícil.

Para el análisis de susceptibilidad, primero se necesita conocer algunas condiciones del terreno y establecer la distribución y actividad reciente de las remociones en masa en el área de estudio. Esto pues, si bien un mapa de inventario no muestra en sí la susceptibilidad a movimientos en masa, contiene información que es requerida en otros tipos de análisis.

### **7.2.1. Inventario**

Como ya ha sido mencionado anteriormente, la región donde se ubica el área de estudio, destaca porque históricamente ha sido afectada por numerosos aluviones detonados por lluvias anómalamente intensas, aunque estos no son el único fenómeno que puede ser provocado por dichos eventos climáticos extremos, entre ellos también cuentan las inundaciones, desbordes de ríos y crecidas de quebradas, cuyo catastro es relevante para dar cuenta de la problemática. De otros tipos de movimientos en la región, como deslizamientos, no se halló información.

En Vallenar, sin embargo, los episodios aluviales históricos son escasos en la bibliografía (Tabla 9). Entre 1900 y el presente, el sector urbano solo fue afectado por aluviones en mayo de 1987, cuando se registraron numerosas bajadas de quebradas arrastrando tras de sí material fino y detritos que fueron a dar al plano de la ciudad (Vargas y Ortega, 2018). Si bien no se nombran dichas quebradas, no se descarta que correspondan a las que cruzan el área de estudio y drenan finalmente hacia el río por la quebrada Valparaíso. El resto de los fenómenos corresponden a eventos hidrometeorológicos de intensidad fuerte a moderada que también afectaron a gran parte del norte de Chile; y con mayores impactos en estas otras localidades, por lo demás. En marzo de 2015, por ejemplo, precipitaron en la Región de Atacama entre 10 mm en la costa y más de 85 mm hacia la cordillera en tres días, lo cual generó avenidas torrenciales en 17 quebradas y flujos muy rápidos y de alta densidad que arrastraron grandes volúmenes de arena y limo por los ríos Salado y Copiapó (Izquierdo y otros, 2018). El mismo evento meteorológico, sin embargo, solo produjo un pequeño desborde del río Huasco en el sector urbano de Vallenar, que fue ocasionado por un pequeño incremento de su caudal, el cual no superó el promedio estadístico (DGA, 2015).



**Tabla 9: Catastro de remociones en masa y principales eventos hidrometeorológicos que han afectado a la Región de Atacama entre 1900 y el presente.** Los datos de precipitaciones sin especificar corresponden a estaciones meteorológicas situadas en Vallenar.

<i>Fecha</i>	<i>Intensidad de lluvias</i>	<i>Fenómeno en Vallenar</i>	<i>Fenómenos en otras localidades</i>
<b>05/2017</b>	43,2 mm/48 h 23,8 mm/48 h (Chañaral)	Socavones y pequeño desborde por crecida del río Huasco en sector ribereño de Vallenar	Inundaciones en el curso inferior del río (Huasco). Activación de 18 quebradas en Alto del Carmen, Freirina, Tierra Amarilla y Chañaral
<b>03/2015</b>	46,7 mm/48 h 23,4 mm/72 h (Copiapó)	Desborde del río Huasco en sector ribereño de Vallenar	Inundaciones y flujos en río Copiapó, inundaciones por crecida histórica del río Salado y avenidas torrenciales en 17 quebradas que afectaron a 7 comunas de Atacama
<b>08/1997</b>	110,9 mm/72 h	Desborde del río Huasco	Desborde del río Huasco (Freirina y Huasco). Desborde del río Copiapó
<b>07/1997</b>	1 mm/24 h	No hay registro	Inundaciones en río Salado, río Copiapó y quebradas afluentes
<b>06/1991</b>	69,5 mm en	Desborde del río Huasco	Inundaciones y aluviones en quebradas de Atacama (Chañaral, Alto del Carmen, entre otros)
<b>07/1987</b>	77,1 mm/48 h 38,5 mm/48 h (Copiapó)	No hay registro	Inundaciones y aluviones en Chañaral, Copiapó, precordillera de los ríos Salado y río Huasco (Alto del Carmen, El Tránsito)
<b>05/1987</b>	20,7 mm/24 h	Aluviones en quebradas y plano de Vallenar	No hay registro
<b>07/1984</b>	94,7 mm/5 días	Temporal sin provocar aluviones ni inundaciones	Aluviones en diversas quebradas de provincias de Copiapó y Huasco
<b>04/1980</b>	14 mm/24 h	No hay registro	Inundaciones y aluvi3n en Copiapó. Inundaciones en río Salado
<b>02/1972</b>	Sin datos de precipitación	No hay registro	Aluviones en quebradas de Alto del Carmen. Inundaciones y aluvi3n en río Salado (Chañaral, El Salado y Pueblo Hundido)
<b>08/1969</b>	9,5 mm/24 h	No hay registro	Aluvi3n en quebrada Monardez (24 km al SE de Vallenar). Anegamientos en Chañaral, El Salado y Copiapó
<b>02/1954</b>	Sin datos de precipitación	No hay registro	Aluviones en Copiapó
<b>01/1906</b>	No se registran	Inundaciones en el plano de Vallenar y cultivos aledaños por deshielos en la cordillera	Inundaciones y aluviones en Copiapó, Tierra Amarilla y varias localidades de Atacama

El que mayoritariamente los eventos expuestos en la tabla tuvieran peores impactos en otras localidades en lugar de Vallenar, aun cuando registraran menores precipitaciones, corrobora que

se necesitan más condiciones para hacer una zona susceptible a remociones en masa. Y, aunque que no existan datos que indiquen que el área de estudio haya sido afectada por avenidas torrenciales no significa que no hayan ocurrido, es lógico que el mayor riesgo de inundación o amenaza asociada a la descarga de quebradas no se encuentra en este sector, sino en el cauce del río Huasco, que cuenta con una gran red de afluentes que incluye las quebradas del área de estudio. Además, se ha observado que los sectores más afectados por aluviones son aquellos ubicados en la desembocadura de las quebradas con mayor hoya hidrográfica (Hauser, 1997).

Hijuela 10 solo recibe la escorrentía de la quebrada Pingueritas, afluente secundario del río Huasco de régimen exclusivamente pluvial y que tiene una hoya hidrográfica de dimensión muy reducida. Lo anterior significa que el agua recolectada antes de su descarga a cotas inferiores del terreno es escasa y la carga de partículas sólidas, que eventualmente podría transportar la corriente, también sería limitada. Además, esta quebrada drena por una pendiente muy baja, lo cual tiene implicancias en la velocidad del flujo. Por tanto, el terreno proyectado para el emplazamiento de los depósitos de relaves es muy seguro en el sentido que solo es cruzado por una pequeña quebrada y esta, además, no se sitúa en una zona montañosa.

La fotointerpretación y datos de campo tampoco proporcionan pistas sobre remociones en masa recientes dentro del área de estudio. No se aprecia deformación del terreno, tal como escalonamiento u ondulaciones. Tampoco se observan masas, escarpes frescos (notorios), grietas ni depresiones que puedan ser indicios de remociones tipo deslizamientos o flujos actuales ni históricos. Además, el área es atravesada por escasas quebradas y en ninguna se detecta desarrollo de abanicos aluviales que sean indicadores de flujos. Por otra parte, las suaves líneas de drenaje halladas en terreno y por imágenes satelitales solo indican que el llano La Totora corresponde a un antiguo abanico. Por último, la única quebrada que cruza Hijuela 10 tiene laderas sin signos de desprendimientos recientes.

### **7.2.2. Análisis de factores ponderados**

La susceptibilidad a remociones en masa depende de factores que pueden ser intrínsecos de la ladera, como la resistencia de la roca, la geometría del terreno, las condiciones de drenaje y la presencia de estructuras, etc., o externos como el clima al que está sometido el material y la intervención antrópica existente (González de Vallejo y otros, 2002).

Lara (2007) desarrolla este método estableciendo un peso en porcentaje a cada grupo de factores condicionantes, que define su grado de importancia en la generación del evento (Tabla 10). El criterio del autor para definir los porcentajes se basa en el trabajo de Sepúlveda (1998), revisión bibliográfica y la aplicación gradual de su propio método en la zona piloto.

**Tabla 10: Despliegue de factores condicionantes (general) para la estimación del grado de susceptibilidad de remociones en masa según Lara (2007).** Los rangos de porcentajes de la tabla corresponden a los del algoritmo diseñado para los flujos, pero la presencia o ausencia de cierto factor, junto con la ponderación asignada a cada uno, dependen del tipo de proceso.

<i>Categoría</i>	<i>Factor</i>	<i>Ponderación (%)</i>
<i>Geomorfología</i>	Pendiente de laderas (F1)	10-35
	Altura máxima de la unidad (F2)	
	Forma (F3)	
	Pendiente canal de drenaje (F4)	
	Encajamiento canal de drenaje (F5)	
	Exposición al sol (F6)	
<i>Geología y geotecnia</i>	Características geológicas-geotécnicas del material (F7)	4-35
	Condiciones de humedad y saturación (F8)	
	Cercanía a fallas y/o zona de cizalle (F9)	
<i>Clima y vegetación</i>	Cobertura vegetal (F10)	0-10
	Acumulación de nieve (F11)	
<i>Intervención antrópica</i>	Desestabilización artificial de laderas (F12)	0-10
	Obstrucción de canales de drenaje (F13)	
<i>Antecedentes</i>	Registro del tipo de remoción en masa especificado (F14)	0-10
<i>Índice de susceptibilidad (IS)</i>		14-100

Luego, el Índice de Susceptibilidad (IS) para un tipo de remoción en masa (RM) dado se calcula con la siguiente fórmula:

$$IS_{RM} = \left( \sum_{i=1}^n F_i \right) \times F_{n+1}$$

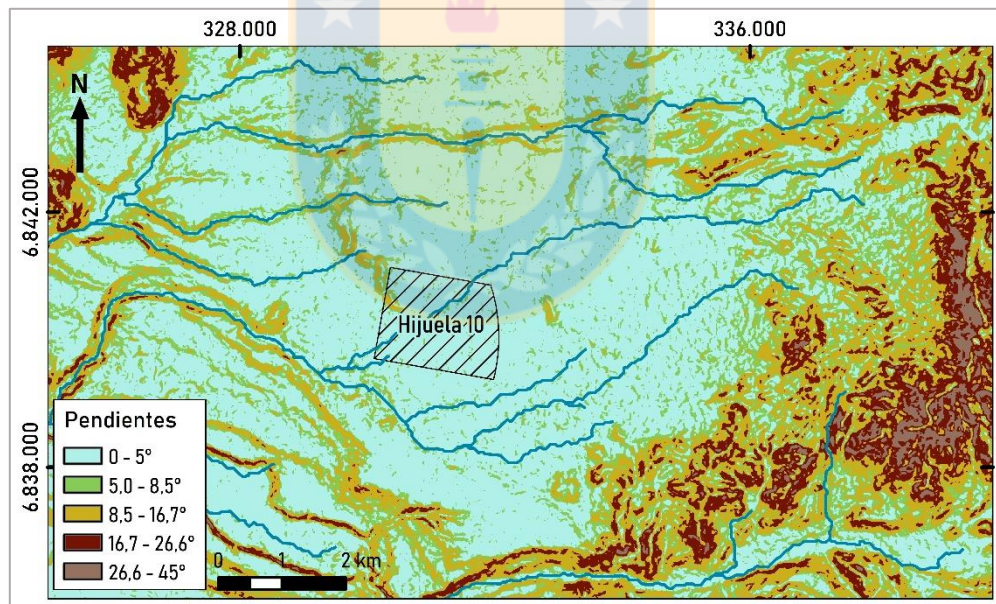
Donde  $F_{n+1}$  corresponde al factor de compatibilidad entre el material de la unidad con el tipo de evento estudiado.

El análisis de las zonas susceptibles a remociones en masa depende del tipo de fenómeno que se está estudiando, dado que para cada proceso los factores condicionantes pueden variar. Por

ello su metodología es adaptada a distintos fenómenos tipo deslizamientos en roca y suelo, flujos y caídas.

Además, se define un factor de compatibilidad entre el material que constituye la unidad estudiada y el tipo de evento evaluado. Por ejemplo: si el evento que se pretende evaluar es “deslizamiento traslacional de roca”, pero la unidad está constituida por una capa de suelo, el factor de compatibilidad será igual a 0, lo cual dará como resultado un índice de susceptibilidad nulo. Si el material es compatible, se le asigna un valor igual a 1. Para fines prácticos, este factor debe ser revisado antes que cualquier otro.

Dada la escala de trabajo y los datos disponibles, el método de ponderación de parámetros es el que mejor se adapta al estudio, sin embargo, solo es aplicable en áreas con pendientes lo suficientemente altas para el desarrollo de condiciones de inestabilidad, por lo que las zonas con pendientes menores de  $16,7^\circ$  ( $<30\%$ ) son descartadas (Figura 10). Con este filtro, no es posible realizar el análisis en Hijueta 10, ya que prácticamente toda su superficie tiene pendientes menores de  $8,5^\circ$  y este factor es determinante en un proceso gravitacional.



**Figura 10: Modelo de pendientes del área de estudio.**

Por otro lado, teniendo en consideración la distancia que existe entre Hijueta 10 y los sectores más escarpados al este, se decide no realizar el análisis de susceptibilidad orientado a procesos de caídas de rocas y de deslizamientos de roca y suelo en dichos sitios debido a su bajo potencial de propagación. Esto además por la incompatibilidad del material de las unidades con el mecanismo estudiado. Por ello, independientemente del tipo de ruptura, los procesos de

deslizamientos de suelo quedan descartados debido a las condiciones geológicas, que no favorecen el desarrollo de una capa de suelo lo suficientemente potente para dar lugar a superficies de ruptura profundas. Del mismo modo, los deslizamientos de rocas son desestimados porque aun en las zonas rocosas las pendientes superiores a  $16,7^\circ$  cubren una escasa superficie y los volúmenes de material que participarían en el desarrollo de un fenómeno de este tipo son bastante bajos.

En cuanto a flujos en general, se asume que su ocurrencia se ve favorecida a pendientes mayores de  $25^\circ$  en la cabecera de hoyas hidrográficas (Hauser, 2000), no obstante, algunos podrían producirse a pendientes menores de  $15^\circ$ , siempre y cuando presente condiciones de inestabilidad geológico-geotécnicos relevantes. Debido a esta posibilidad, este es el único tipo de remoción en masa que será analizado en el estudio.

### 7.2.2.1. Flujos

La evaluación de este mecanismo considera que se generan a partir del arrastre de material contenido en unidades tipo canal de drenaje. Específicamente, se estudian los drenajes de la cabecera de la hoya hidrográfica Quebrada Pingueritas, que es la que influye en Hijueta 10 (Figura 11).

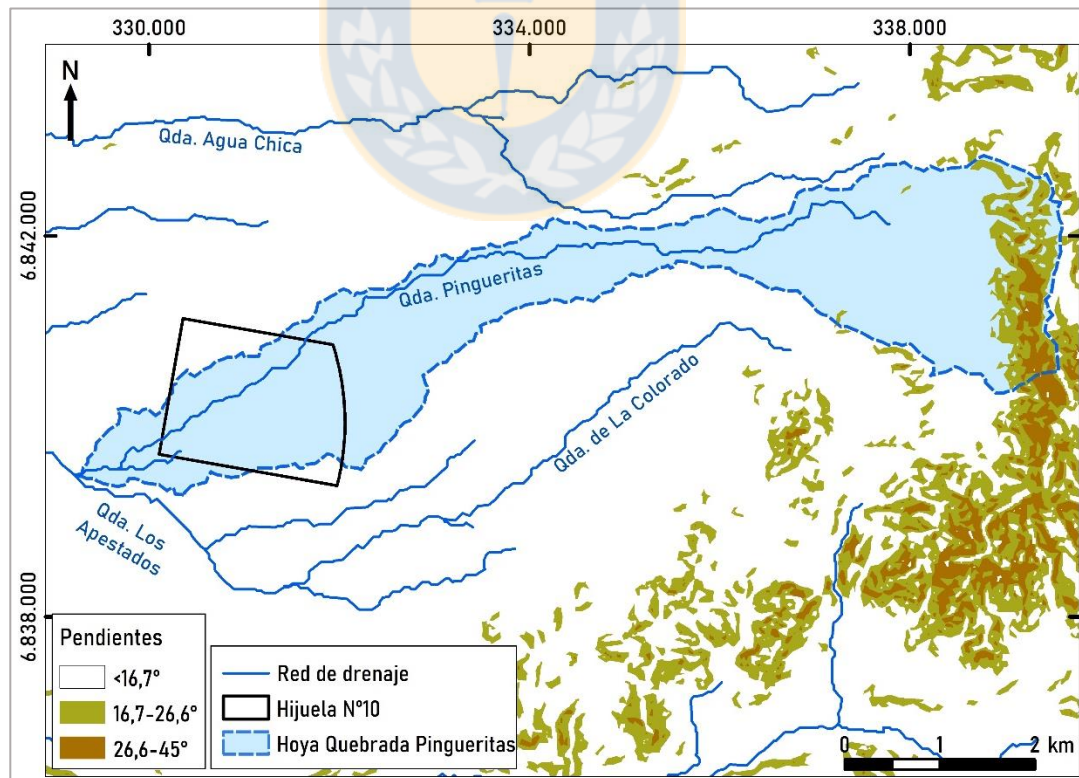


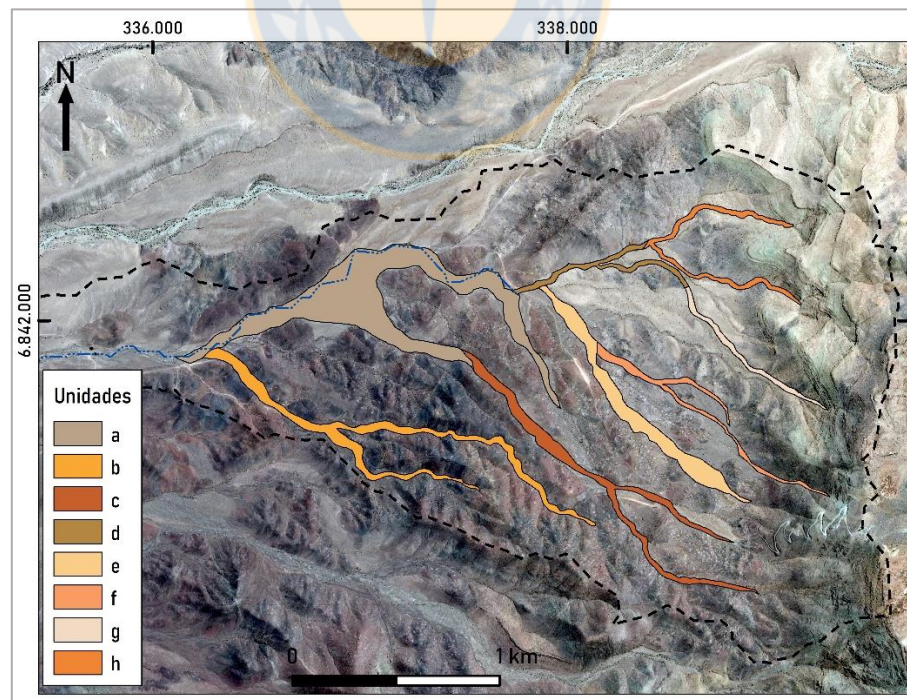
Figura 11: Hoya hidrográfica Quebrada Pingueritas.



El sistema utilizado para el análisis de flujos es una adaptación de Lara (2007) realizado por Muñoz (2013). Sin embargo, la correlación entre rangos y ponderaciones asignadas no siempre se ajusta apropiadamente al presente estudio, lo cual se debe a que el terreno posee condiciones que son distintas a las de los otros sectores estudiados. Ello implica tener que realizar una calibración del sistema en relación a los factores y sus divisiones.

En comparación con dichos sistemas en donde los cálculos se aplicaron en Chile central, los factores condicionantes del área de estudio, tales como el grado de meteorización de las rocas y los estados de humedad y saturación, disminuyen drásticamente. Por ello, los rangos de pendiente de los canales de drenaje utilizados en la ponderación deben ser aumentados, considerando que las buenas condiciones geológicas existentes contribuyen en hacer la superficie más estable que una de la misma inclinación, pero con propiedades menos resistentes. También significa eliminar algunos rangos o subfactores y agregar otros que no fueron detallados por Muñoz (2013). Además, se elimina el factor de cercanía a fallas y/o zonas de cizalle para incluirlo solo en el fracturamiento de los macizos rocosos en el factor de geología y geotecnia. Todas estas modificaciones y el sistema de Muñoz (2013) utilizado como base están en el anexo de esta Memoria de Título.

Posteriormente, la zona de la cabecera se divide en 8 unidades de canal de drenaje (Figura 12), definidas de acuerdo a características geomorfológicas.



**Figura 12: Unidades de canal de drenaje en la cabecera de la hoya hidrográfica Quebrada Pingueritas.**

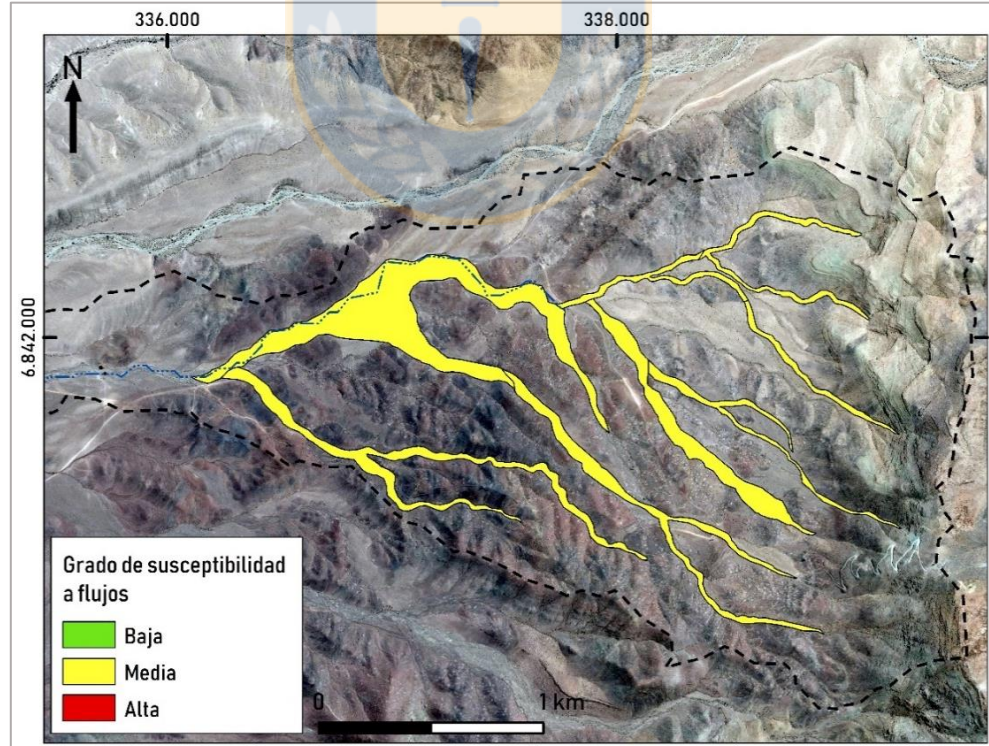


Con las unidades definidas y la adaptación realizada en el sistema de factores condicionantes se obtiene un valor de “Índice de Susceptibilidad” asociado a cada unidad expresado en porcentajes (Tabla 11).

**Tabla 11: Ponderaciones de cada unidad de canal de drenaje definida en el área de estudio.**

<i>Factor</i>	<i>Ponderación (%)</i>							
	<i>Unidades de canal de drenaje</i>							
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>	<i>G</i>	<i>H</i>
Pendiente canal de drenaje al pie de la ladera	5	5	5	5	5	5	5	5
Encajamiento canal de drenaje	4	15	15	15	8	15	8	15
Características geológicas-geotécnicas del material	13	13	13	13	13	13	13	13
Condiciones de humedad y saturación	7	7	7	7	7	7	7	7
Cobertura vegetal	3	3	3	3	3	3	3	3
Obstrucción de canal de drenaje	0	0	0	0	0	0	0	0
Aluviones declarados en la hoya hidrográfica	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Índice de susceptibilidad de la unidad</i>	26	37	37	37	30	37	30	37

Los cuales pueden ser representados en un mapa de susceptibilidad (Figura 13).



**Figura 13: Mapa de susceptibilidad a flujos en la cabecera de la hoya hidrográfica Quebrada Pingueritas.**

Se debe tener en consideración que, aunque los rangos en la tabla sean expresados en valores numéricos, el método para su obtención es cualitativo, por lo que finalmente, el potencial de ocurrencia también se expresa en términos cualitativos en el mapa. Los rangos de 0 a 25% equivalen a una susceptibilidad baja, desde el 25% hasta 50% significa susceptibilidad media y sobre 50%, alta. Así, la información otorgada por el mapa de susceptibilidad indica que existe una posibilidad moderada de que en las quebradas que bajan por la cabecera de la hoya hidrográfica, y que tributan a la quebrada Pingueritas, se produzcan remociones en masa tipo flujos.

Los índices de susceptibilidad medios obtenidos son reflejo de las condiciones geológicas y geomorfológicas de las unidades, que suponen más atributos adecuados que deficientes para el terreno. Entre ellas figuran el bajo acopio de detritos y las bajas pendientes en el fondo de los canales de drenaje, pero que tienen buen encajamiento a la vez. Cabe destacar que las pequeñas variaciones en los índices de susceptibilidad de cada unidad están determinadas solo por el factor geomorfológico, es decir, por la pendiente de los canales.

Las características son mucho mejores en Higuera 10, ya que, al encontrarse en la parte inferior de la quebrada, no reúne las condiciones de inestabilidad necesarias para constituir un área de iniciación de flujos. Sin embargo, *a priori*, podría constituir una zona de propagación, es decir, que posibles eventos provenientes de la cabecera de la quebrada Pingueritas tengan alcance hasta la ubicación del terreno de ENAMI. Esta suposición es basada solo en la trayectoria lógica del eventual flujo a través de la misma quebrada, pero no considera la masa necesaria para dar origen a un movimiento lo suficientemente voluminoso. Tampoco está basado en simulaciones de velocidad.

## 8. RESULTADOS

De acuerdo a las observaciones realizadas en Hijueta 10, los componentes geológicos altamente estables, junto con el escaso relieve y otras características geológica-geomorfológicas apropiadas, hacen considerar al terreno como buen suelo de fundación y geológicamente inactivo en cuanto a generación de eventos de remoción en masa. Esto último es inferido principalmente por las bajas pendientes que se consideran como determinantes para la iniciación de la gran mayoría de estos movimientos.

A pesar de lo anterior, se dispone de registros que permiten establecer que, una vez iniciados, los flujos de detritos se movilizan sobre superficies con pendientes entre  $10^\circ$  y  $16,7^\circ$ , e incluso inferiores a  $1^\circ$  (Rodolfo y otros, 1989 en Hauser, 2000), lo cual da cuenta de la alta resistencia al corte, la gran capacidad de transporte y el alcance de este peligro, incluso en terrenos subhorizontales como el del área de estudio.

En ese sentido, es importante destacar que la investigación sobre amenazas de remociones en masa en este trabajo se ha desplazado del análisis y evaluación de la probabilidad de que ocurra una remoción en masa en sí, al análisis del área de propagación de esta.

Para determinar si un flujo proveniente de zonas más altas tendría alcance en el terreno, se analiza el área de la cabecera de la única quebrada con depósitos activos que pasa por el terreno de ENAMI y se aplica la metodología de ponderación de parámetros, pues en la fase en que se encuentra el proyecto es el mejor sistema dada la información disponible.

La susceptibilidad a remociones en masa de las unidades de canal de drenaje en la cabecera de la hoya hidrográfica es media, por lo que hay posibilidades de que se generen estos procesos. Luego, a partir de la premisa de que zonas de relieve más pronunciado e inestable pueden aportar y transportar material por varios kilómetros, y aun en zonas de baja pendiente, se puede inferir que, si existen las condiciones adecuadas, un eventual flujo podría tener alcance en Hijueta 10.

Esta suposición es realizada sin considerar la masa necesaria para dar origen a un flujo lo suficientemente voluminoso. Aunque, por lo observado en terreno y en imágenes satelitales, se estima un bajo aporte de material movilizable en el sector de la cabecera, ya que este está constituido principalmente por un bajo relleno de detritos sueltos en los canales de drenaje y por rocas con bajo grado de fracturamiento y meteorización, es decir con escaso suelo o regolito.

Tampoco está basada en simulaciones de velocidad. Aunque existe información que permite estimar el potencial destructivo de estos eventuales flujos. Por ejemplo, en el caso de la

pendiente media, el valor es bajo en todas las unidades de canal de drenaje (8° aproximadamente), lo cual aporta información sobre la velocidad de la escorrentía, su poder de arrastre y erosión. Adicionalmente, la distancia entre el terreno de ENAMI y el área analizada en materia de susceptibilidad a remociones en masa es de 5 km aproximadamente, lo cual es bastante teniendo en cuenta que el cauce, además, presenta sinuosidad. Por lo que, independiente del índice de susceptibilidad a flujos que poseen las unidades de la cabecera, el alcance de estos movimientos a Hijuela 10 tampoco supone gran potencial destructivo debido a que la intensidad sería muy baja en cuanto a profundidad y velocidad.

De todas formas, las observaciones de estos procesos gravitacionales sugieren que en la cabecera deben juntarse los torrentes de más de un canal como condición para formar un flujo considerable (Polansky, 1966). En ese sentido, las susceptibilidades más altas están en hoyas hidrográficas de grandes dimensiones (Hauser, 1997), pero la hoya de Quebrada Pingueritas solo tiene 1239,4 ha.

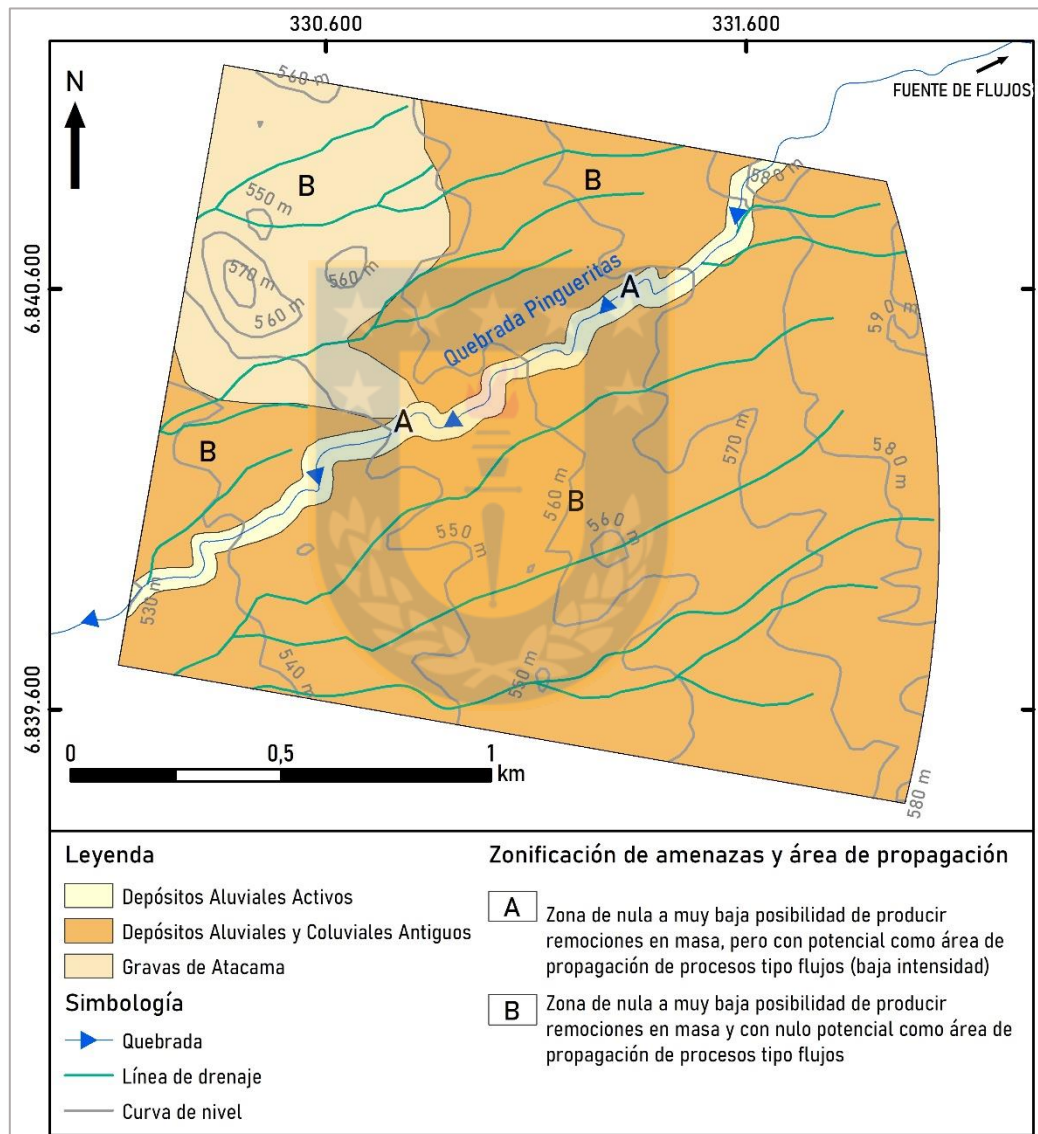
Por estas razones, un flujo proveniente de la cabecera de la hoya Quebrada Pingueritas no tendría alcance en el sitio de interés, o bien, llegaría con mucha menor intensidad que la que tenía al inicio y con notable pérdida de material (detritos y barro). Incluso, es probable que la quebrada solo constituya un canal de escorrentía. En tal caso, el agua de una avenida torrencial podría actuar como agente de erosión en las laderas de la quebrada.

De todas formas, ya que las disposiciones actuales para la reducción o mitigación de los daños potenciales apuntan a reducir la vulnerabilidad de los elementos expuestos, ya no es necesario evitar todo lugar expuesto a peligros geológicos, sino utilizar diversas medidas estructurales de prevención y mitigación. En el área de estudio, por ejemplo, se utilizan zanjas de captación junto a otros depósitos de relaves, que sirven tanto para la desviación y/o encauzamiento de avenidas torrenciales como también de receptáculos de retención.

Aun con estas acciones, es importante no prescindir del estudio geológico del terreno como medida no estructural, pues permite adoptar las alternativas tecnológicas adecuadas para las medidas que son estructurales y el diseño mismo del depósito. Por eso resultan valiosos los mapas geotécnicos.

Al aportar datos sobre las características y propiedades del suelo de la zona de estudio, los mapas permiten hacer evaluaciones sobre el comportamiento del terreno y prever los problemas geológicos y geotécnicos durante la construcción y estados posteriores de la obra de ingeniería.

El mapa geotécnico elaborado en este estudio, además de resumir la información geológica y geotécnica más relevante, incluye la zonificación de amenazas con el comportamiento esperado del movimiento en masa identificado en el área, teniendo en cuenta tanto la zona de iniciación como la zona de propagación (Figura 14). Esto puede ser de utilidad para los especialistas al momento de escoger la localización de nuevos depósitos de relaves en el terreno de ENAMI, ya que permite distinguir las áreas más seguras de aquellas que son favorables para la propagación de flujos provenientes de áreas medianamente susceptibles



**Figura 14: Zonificación de amenazas enfocada en áreas de propagación de remociones en masa del tipo flujo.**



Para un mayor grado de precisión en los resultados, los métodos para la evaluación y zonificación de los niveles de amenaza deberían relacionar los elementos internos de las laderas a estudiar con los agentes desencadenantes que, tal como indica su nombre, determinan en gran medida la ocurrencia o no del movimiento del terreno.

En la zona norte del país, las precipitaciones intensas son preferentemente las desencadenantes de aluviones, por lo que se debiera determinar el umbral de precipitaciones que activa el desarrollo de flujos aluviales. De esta manera se podría conocer el periodo de retorno asociado a ambos fenómenos y relacionarlo con el período de vida útil de los proyectos. Varios autores proponen métodos para la estimación de la frecuencia de estos eventos, su aplicabilidad y limitaciones, sin embargo, la determinación de estos umbrales se hace compleja al no contar con un registro adecuado de la pluviosidad y con los escasos antecedentes recogidos de remociones en masa dentro del área de estudio.

Cabe destacar que, independiente de los resultados obtenidos, no hay registro de grandes derrames de relaves por la ocurrencia de remociones en masa en Chile y, en general, las estructuras actuales han tenido un adecuado comportamiento ante fenómenos de gran intensidad como el terremoto de 2010, lo cual indica que no son demasiado vulnerables a procesos gravitacionales.

Entre las limitaciones y desventajas del trabajo realizado y su metodología, destaca el sistema utilizado para analizar la susceptibilidad. Si bien el sistema de ponderación de factores condicionantes busca ser aplicable en diversas condiciones geológicas y geográficas del territorio nacional, esta debió ser modificada en diversos ítems y luego calibrada para adecuarse al área de estudio, aun considerando que los valores de ponderación son establecidos cualitativamente. Por ello la mayor desventaja radica en la subjetividad.

Además, los resultados obtenidos de los *softwares* SIG dependen de la calidad de los datos e imágenes proporcionadas, las cuales podrían tener mejor resolución. En el caso del inventario de remociones en masa mediante fotointerpretación, es más eficiente y detallado usar fotografías aéreas.

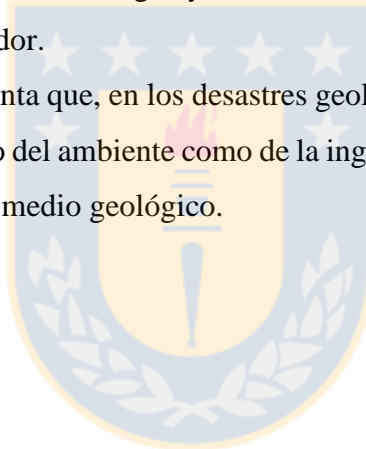
Por otro lado, una etapa de terreno con mayor detalle contemplando ensayos *in situ* y otra etapa con pruebas de laboratorio permitirían la descripción de propiedades físicas y mecánicas de los materiales de forma cuantitativa y podrían entregar también información del subsuelo para una mejor caracterización geotécnica.



Todos estos esfuerzos se relacionan a la cercanía del proyecto a un espacio antropogénico. Específicamente, los depósitos de relaves se localizarían aproximadamente a 2 km de la ciudad de Vallenar, por lo que tendrían inevitablemente un impacto social. No obstante, como se ha mencionado anteriormente, los depósitos de relaves son actualmente estructuras indispensables que se pueden diseñar, operar y cerrar con técnicas y controles que aseguran la estabilidad física, química y ambiental. Por ello, a pesar de que el proyecto constituiría un problema a futuro con la comunidad, con los tecnicismos adecuados se puede garantizar que los daños se reduzcan. Además, el uso de nuevas tecnologías podría tener varios beneficios, como el aumento de la vida útil del depósito y la minimización de la superficie de suelo requerida para disponer los relaves.

Con todo, aún existen desafíos en los depósitos de relaves, como el tratamiento y neutralización de residuos previo a su acumulación, la reducción de los riesgos geotécnicos y la necesidad de mejorar la recuperación de agua y las normas ambientales, como la determinación de distancias seguras al concentrador.

Por último, tener en cuenta que, en los desastres geológicos y ambientales por depósitos de relaves, los problemas son tanto del ambiente como de la ingeniería, consecuencia de la interacción entre actividades humanas y el medio geológico.



## 9. CONCLUSIONES

El sitio Hijuela 10 presenta una superficie subhorizontal y poco accidentada, disectada por una quebrada secundaria y varias líneas de drenaje de menor profundidad que forman parte de la red hidrográfica del río Huasco. Geomorfológicamente, el terreno está localizado en una extensa llanura aluvial constituida por tres depósitos que alcanzan gran espesor en su conjunto.

Dichas unidades corresponden a las Gravas de Atacama, Depósitos Aluviales y Coluviales Antiguos y Depósitos Aluviales Activos, las que se componen a su vez de granos de tamaño ripio y grava, principalmente; arena y, en menor medida, finos, parcialmente estratificados, escasamente seleccionados y moderadamente compactos.

Los componentes descritos configuran un terreno con aceptables características y comportamientos geotécnicos para fundación, ya que las partículas de un suelo granular suelen ser estables y resistentes. Además, se trata de un suelo medianamente denso a denso y no plástico, lo cual le confiere mayor resistencia.

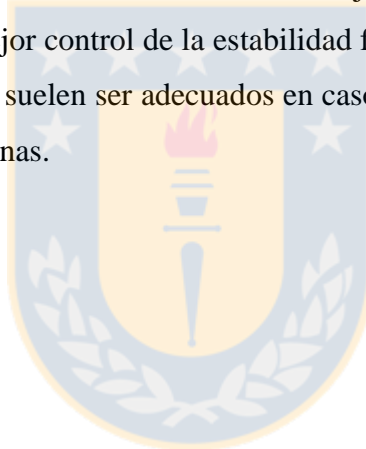
Hijuela 10 podría ser afectada por sismos de mediana a alta intensidad y se encuentra en una zona descrita como laguna sísmica. Es decir, existe una alta probabilidad de que ocurran futuros terremotos, por lo que se debe tener en cuenta esta información en el diseño de la estructura que se desea instalar.

En relación a procesos gravitacionales, como resultado de las estimaciones realizadas, la resistencia de la superficie del terreno, la falta de antecedentes y la ausencia de depósitos de remoción en masa, es posible establecer que el área en sí misma tiene nula a muy baja susceptibilidad a procesos tipo caídas, deslizamientos y flujos, hasta el punto de no ser posible ejecutar el método de análisis por la ausencia de laderas inestables. A pesar de ello, la existencia de líneas de drenaje y, particularmente una quebrada que disecta el sitio, sugiere que esta podría constituir un área de propagación de eventuales flujos provenientes de zonas más altas (Zona A), cuya posibilidad de ocurrencia se estima moderada con el método de ponderación de parámetros. Sin embargo, no es posible determinar con precisión la intensidad de dichos procesos, ya que tampoco existe registro de ellos en la zona analizada. De todas formas, la información disponible sobre estos procesos gravitacionales sugiere que un flujo proveniente de la cabecera de la hoya Quebrada Pingueritas llegaría con mucha menor intensidad que la que tenía al inicio y con notable pérdida de material. Incluso, es probable que la quebrada solo constituya un canal de escorrentía.

Debido a las razones entregadas, se resuelve que el sitio Hijuela 10 es un terreno con características geológicas, geomorfológicas y geotécnicas bastante favorables. Adicionalmente, el peligro sísmico y la amenaza de remociones en masa identificados constituyen un riesgo que, a pesar de no poder predecirse, puede ser manejado con diseños de ingeniería adecuados y por el cual no debe restringirse la ocupación del área de interés.

Especialmente, es factible el emplazamiento del o los depósitos de relaves en las zonas llanas ocupadas por los Depósitos Aluviales y Coluviales Antiguos o descritas con nula a muy baja posibilidad de producir flujos (susceptibilidad) y con nulo potencial como de áreas de propagación (Zona B).

Por consiguiente, más allá de la ausencia de depresiones naturales que restringe la construcción de depósitos de relaves tipo embalse, no existen grandes limitaciones geológicas en la elección del método a emplear. Aun así, lo más aconsejable es usar algún método con mayor tecnología, que apunte a un mejor control de la estabilidad física y química. Para ese objetivo, los depósitos espesados o en pasta suelen ser adecuados en casos como proyectos en zonas de climas secos y cálidos, y con áreas planas.



## REFERENCIAS

- AGUILAR, G.; RIQUELME, R.; MARTINOD, J. Y DARROZES, J. 2013. Rol del clima y la tectónica en la evolución geomorfológica de los Andes Semiáridos chilenos entre los 27-32°S. *Andean Geology*. Vol. **40** (1): 79-101. Santiago.
- ARÉVALO, C. Y WELKNER, D. 2008. Geología del Área Carrizal Bajo-Chacritas. Servicio Nacional de Geología y Minería. Serie Geología Básica N° 111. 67 pp. Santiago.
- ARÉVALO, C.; MOURGUES, F. Y CHÁVEZ R. 2009. Geología del Área Vallenar-Domeyko. Servicio Nacional de Geología y Minería. Serie Geología Básica N° 120. 64 pp. Santiago.
- ÁVALOS, P.; FERNÁNDEZ, H.; RETAMAL, R.; HERRERA, C.; BEMBOW, M.; TRONCOSO, R. Y CUSTODIO, E. 2009. Antecedentes sobre la Hidrogeología de la Cuenca del Río Huasco, Región de Atacama, Chile. Congreso Geológico Chileno N° 12. Vol. **6**: 1-4. Santiago.
- BARAHONA, C. 2016. Precipitación asociada a bajas segregadas en el hemisferio sur. Tesis para optar al Grado de Magíster en Meteorología y Climatología. Universidad de Chile, Departamento de Geofísica (Inédito): 167 pp. Santiago.
- BARBAT, A. 1998. El riesgo sísmico en el diseño de edificios. Calidad siderúrgica: 248 pp. Madrid.
- BLIGHT, G. 1997. Destructive mudflows as a consequence of tailings dyke failures. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*. Vol. **125** (1): 9-18.
- BOBILLIER, C. 1926. Año de 1922: Terremoto de Atacama. Boletín del Servicio Sismológico de Chile. N° 16. 44 pp. Santiago.
- CAMPOS, F. 2014. Evaluación de la susceptibilidad de remociones en masa en la quebrada de Los Chanchos, Región Metropolitana, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 133 pp. Santiago.
- CAMUS, F. 1980. Posible modelo genético para los yacimientos de cobre del distrito minero Punta del Cobre. *Revista Geológica de Chile*. Vol. **11**: 51-76 pp. Santiago.
- CASTRO, C.; MAGALLANES, V. Y SOTO, M. 2018. Riesgos siconaturales asociados a amenazas hidromorfológicas en la ciudad de Copiapó. Aluviones y resiliencia en Atacama (Vargas, G.; Pérez, S. y Aldunce, P. editores). Social Ediciones: 357 pp. Santiago.
- COBB, K.; CHARLES, C.; CHENG, H. Y EDWARDS, L. 2003. El Niño/Southern Oscillation and tropical Pacific climate during the last millennium. *Nature*. Vol. **424**: 271-276.
- COCHILCO, 2017. Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales 1997-2016 (Inédito): 166 pp. Santiago.
- CREIXELL, C.; ORTIZ, M. Y ARÉVALO, C. 2012. Geología del área Carrizalillo-El Tofo. Servicio Nacional de Geología y Minería. Serie Geología Básica N° 133-134. 82 pp. Santiago.
- CHARRIER, R.; PINTO, L. Y RODRÍGUEZ, M. 2007. Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. *The Geology of Chile* (Moreno, T y Gibbons, W. editores). The Geological Society: 395 pp. Londres.
- DGA, 2004. Cuenca del río Huasco. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad (Inédito): 105 pp. Santiago.
- DGA, 2013. Análisis integrado de gestión en cuenca del río Huasco. Región de Atacama (Inédito): 307 pp. Santiago.
- DGA, 2015. Información pluviométrica, fluviométrica, estado de embalses y aguas subterráneas. Boletín N° 443: 32 pp. Santiago.

- DOBRY, 1965. Efectos del sismo de marzo de 1965 en los tranques de Relaves de El Cobre. *Revista del IDIEM*. Vol. **4**. N° 2: 85-107. Santiago.
- ENAMI, 2017. Reporte de sustentabilidad (Inédito): 199 pp. Santiago.
- ESPINOSA, G.; HAJEK, G. Y FUENTES, E. 1985. Distribución geográfica de los deslizamientos de tierras asociados a desastres en Chile. *Ambiente y Desarrollo*. Vol. **1**. N° 2: 81-90. Bogotá.
- FALCÓN, M. Y HERRERA, L. 2018. Small tailings deposits in Chile: national impact of publicly available data. *International Congress on Large Dams N° 26*: 14 pp. Viena.
- FALCÓN, M.; HERRERA, L. Y EDWARDS, S. 2017. Analysis of the impact of the March 2015 flood on the tailings deposits in the Copiapó valley. *International Seminar on Tailings Management N° 4*: 1-12. Santiago.
- FUNDACIÓN CHILE. 2018. Avances y retos para la gestión de los depósitos de relaves en Chile. Programa Tranque (Inédito): 69 pp. Santiago.
- GABALDA, G.; NALPAS, T. Y BONVALOT, S. 2005. The base of the Atacama Gravels Formation (26°S, Northern Chile): First results from gravity data. *International Symposium on Andean Geodynamics N° 6*: 286-289. Barcelona.
- GONZÁLEZ DE VALLEJO, L.; FERRER, M.; ORTUÑO, L. Y OTEO, C. 2002. Ingeniería Geológica. Editorial Pearson: 744 pp. Madrid.
- HAUSER, A. 1997. Los aluviones del 18 de junio de 1991 en Antofagasta: un análisis crítico a cinco años del desastre. *Servicio Nacional de Geología y Minería. Boletín N° 49*. 47 pp. Santiago.
- HAUSER, A. 2000. Remociones en masa en Chile (Versión actualizada). *Servicio Nacional de Geología y Minería. Boletín N° 59*. 89 pp. Santiago.
- HIGHLAND, L. Y BOBROWSKY, P. 2008. The Landslide Handbook - A Guide to Understanding Landslides. *Geological Survey Circular N° 1325*: 129 pp. Reston.
- IZQUIERDO, T.; ABAD, M.; JUSTO, B.; BERNÁRDEZ, E. Y ARANCIBIA, M. 2018. El evento hidrometeorológico del 25M en la ciudad de Copiapó: análisis de la inundación y los daños en el casco urbano. *Aluviones y resiliencia en Atacama* (Vargas, G.; Pérez, S. y Aldunce, P. editores). Social Ediciones: 357 pp. Santiago.
- LARA, M. 2007. Metodología para la evaluación y zonificación de peligro de remociones en masa con aplicación en Quebrada San Ramón, Santiago Oriente, Región Metropolitana. Memoria para optar al Título de Geólogo. Tesis para optar al Grado de Magíster en Ciencias Mención Geología. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 212 pp. Santiago.
- LEYTON, F.; RUIZ, J.; CAMPOS, J. Y KAUSEL, E. 2009. Intraplate and interplate earthquakes in Chilean subduction zone: A theoretical and observational comparison. *Physics of the Earth and Planetary interiors*. Vol. **175** (1-2): 37-46.
- MCCANN, W.; NISHENKO, S.; SYKES, L. Y KRAUSE, J. 1979. Seismic gaps and plate tectonics: seismic potential for major boundaries. *Earthquake Prediction and Seismicity Patterns*. Birkhäuser: 1082-1147. Basilea.
- MARÍN, V.; MUÑOZ, A. Y NARANJO, J. 2018. Víctimas fatales causadas por remociones en masa en Chile (1928-2017). *Congreso Geológico Chileno N° 15*. Vol. **2**: 217-220. Concepción.
- MEDVINSKY-ROA, G.; CAROCA, V. Y VALLEJO, J. 2015. Informe sobre la situación de los relaves mineros en Chile para ser presentado en el cuarto informe periódico de Chile para el Comité de Derechos Económicos, Sociales y Culturales, perteneciente al Consejo Económico Social de la Naciones Unidas. *Fundación Relaves Chile y Fundación Terram* (Inédito): 23 pp. Santiago.

- MOSCOSO, R, Y MPODOZIS, C. 1988. Estilos estructurales en el Norte Chico de Chile (28-31°S), regiones de Atacama y Coquimbo. *Revista Geológica de Chile*. Vol. **15** (2): 151-166. Santiago.
- MUÑOZ, E. 2013. Susceptibilidad de remociones en masa y de respuesta sísmica asociada a fallas mayores en zonas urbanas. Estudio de caso en Viña del Mar, V región. Tesis para optar al Grado de Magíster en Ciencias Mención Geología. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 164 pp. Santiago.
- POLANSKI, J. 1966. Flujos rápidos de escombros rocosos en zonas áridas y volcánicas. Eudeba: 67 pp. Buenos Aires.
- QUEZADA, J. 2006. Fenómenos climáticos anómalos en el litoral del Norte de Chile y su impacto en el relieve. Congreso Geológico Chileno N° 11. Vol. 2: 133-136. Antofagasta.
- QUEZADA, J. 2010. Efectos de la tectónica y el clima en la configuración morfológica del relieve costero del norte de Chile. *Andean Geology*. Vol. **37** (1): 78-109. Santiago.
- RAMÍREZ, N. 2007. Guía técnica de operación y control de depósitos de relaves. Servicio Nacional de Geología y Minería (Inédito): 42 pp. Santiago.
- RIQUELME, R.; HÉRAIL, G.; MARTINOD, J.; CHARRIER, R. Y DARROZES, J. 2006. Evidencias geomorfológicas de basculamiento y cambios climáticos neógenos en la región de ante-arco del desierto de Atacama (26°S-28°S). Congreso Geológico Chileno N° 11. Vol. **2**: 315-316. Antofagasta.
- RIVEROS, R. Y RIQUELME, R. 2009. Morfoestratigrafía neógena-cuaternaria de la cuenca de río Huasco, norte de Chile: Implicancias eustáticas, tectónicas y climáticas en el desarrollo de un sistema fluvial en el antearco externo de los Andes centrales. Congreso Geológico Chileno N° 12. Vol. **22**: 1-4. Santiago.
- RONDANELLI, R.; RUTLLANT, J; MOLINA, A; ARRIAGADA, A. Y FUENTES, R. 2018. Gatillantes oceánicos y atmosféricos de la tormenta de Atacama de marzo de 2015. Aluviones y resiliencia en Atacama (Vargas, G.; Pérez, S. y Aldunce, P. editores). Social Ediciones: 357 pp. Santiago.
- RUTLLANT, J. 2005. Aspectos de la circulación atmosférica de gran escala asociada al ciclo ENOS 1997-1999 y sus consecuencias en el régimen de precipitación en Chile central. Libro El Niño - La Niña 1997-2000. Sus efectos en Chile. Comité Oceanográfico Nacional - Chile: 61-76. Valparaíso.
- SEGERSTROM, K. Y RUIZ, C. 1962. Geología del Cuadrángulo Copiapó, Provincia de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería. Serie Geología Básica N° 6. 115 pp. Santiago.
- SEPÚLVEDA, A.; PATIÑO, J. Y RODRÍGUEZ, C. 2016. Metodología para evaluación de riesgo por flujo de detritos detonados por lluvia: caso Útica, Cundinamarca, Colombia. *Obras y Proyectos*. Vol. **20**: 31-43. Concepción.
- SEPÚLVEDA, S. 1998. Metodología para evaluar el peligro de flujos de detritos en ambientes montañosos: Aplicación en la quebrada Lo Cañas, Región Metropolitana. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 93 pp. Santiago.
- SEPÚLVEDA, S.; REBOLLEDO, S.; LARA, M. Y PADILLA, C. 2006. Landslide hazards in Santiago, Chile: An overview. Proceedings of the 10th Congress of the International Association of Engineering Geology and the Environment. Paper N° 105: 1-8. Londres.
- SERNAGEOMIN, 2007. Movimientos en Masa en la Región Andina: Una Guía para la Evaluación de Amenazas. Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas. Publicación Geológica Multinacional N° 4: 404 pp. Santiago.



- SERNAGEOMIN, 2007. Guía técnica de operación y control de depósitos de relaves (Inédito): 41 pp. Santiago.
- SERNAGEOMIN, 2018. Estudios de normativas internacionales de diseño, construcción, operación, cierre y post cierre de depósitos de relaves. Informe final. Vol. 4: 185 pp.
- SQUEO, F.; LETELIER, L.; ESTÉVEZ, R.; CAVIERES, L.; MIHOC, M.; LOPEZ, D. Y ARANCIO, G. 2008. Definición de los sitios prioritarios para la conservación de la flora nativa de la Región de Atacama. Libro rojo de la flora nativa y de los sitios prioritarios para su conservación: Región de Atacama. Ediciones Universidad de La Serena: 137-163. La Serena.
- UYEDA, S., Y KANAMORI, H. 1979. Back-arc opening and the mode of subduction. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. Vol. **84** (3): 1049-1061.
- VARGAS, G. Y ORTEGA, C. 2018. El aluvión de marzo de 2015, El Niño y los mayores episodios históricos en Chañaral de las Ánimas, Atacama. Aluviones y resiliencia en Atacama (Vargas, G.; Pérez, S. y Aldunce, P. editores). Social Ediciones: 357 pp. Santiago.
- VARGAS, G.; ORTLIEB, L. Y RUTLLANT, J. 2000. Aluviones históricos en Antofagasta y su relación con eventos El Niño/Oscilación del Sur. *Revista Geológica de Chile*. Vol. **27** (2): 157-176. Santiago.
- VARGAS, G.; PANTOJA, S.; RUTLLANT, J.; LANGE, C. Y ORTLIEB, L. 2007. Enhancement of coastal upwelling and interdecadal ENSO-like variability in the Peru-Chile Current since late 19th century. *Geophysical Research Letters*. Vol. **34**: 1-6.
- VARNES, D. 1978. Slope Movement Types and Processes. Landslides: Analysis and control (Schuster, R.L y Krizek, R.J. editores). Transportation Research Board, Special Report N° 176: 234 pp. Washington D.C.
- VILLAVICENCIO, G.; ESPINACE, R.; PALMA, J.; FOURIE, A. Y VALENZUELA, P. 2013. Failures of sand tailings dams in a highly seismic country. *Canadian Geotechnical Journal*. Vol. **51** (4): 449-464.
- WIECZOREK, G. 1996. Landslide triggering mechanisms. Landslides: investigation and mitigation. Transportation Research Board Special Report: 76-90.

# ANEXO



**Desglose de factores y peso (en %) para la evaluación de la susceptibilidad a remociones en masa tipo flujo según propuesta de Muñoz (2013).**

<i>Factor</i>	<i>Especificaciones</i>	<i>Rangos</i>	<i>Ponderación (%)</i>
<i>Pendiente canal de drenaje</i>	Pendiente promedio de canales de drenaje	>10°	20
		5-10°	15
		<5°	5
<i>Encajamiento canal de drenaje</i>	Dado por la geomorfología y la relación profundidad/ancho del canal. Un encajamiento alto corresponde a un valor alto de esta razón (>0,7)	Alto	15
		Medio	8
		Bajo	4
<i>Características geológicas-geotécnicas del material</i>	Considerar la calidad del macizo rocoso y grado de meteorización. Espesor de suelo o cubierta de regolito. Se evalúa condición ante posible ocurrencia del mecanismo	Muy favorable	15
		Favorable	12
		Medianamente favorable	10
		Poco favorable	6
		Muy poco favorable	2
<i>Condiciones de humedad y saturación</i>	Asociado a: (1) Capacidad de saturación, nivel freático < 2 m muy favorable; >2 m poco favorable; 2 m favorable. (2) Capacidad de almacenaje de agua en el suelo. (3) Variaciones estacionales de humedad	Muy favorable	10
		Favorable	7
		Medianamente favorable	5
		Poco favorable	3
		Sin antecedentes	0
<i>Cercanía a fallas y/o zona de cizalle</i>	Definir si la zona analizada está cerca de la falla mayor	Unidad a más de 100 metros de falla mayor	1
		Cercanía a falla mayor y/o zona de cizalle Unidad a menos de 100 metros de falla mayor	3
		Unidad es atravesada por una falla mayor	5
<i>Cobertura vegetal</i>	Evaluar si esta es favorable o no para detener el mecanismo en la unidad. Favorables son árboles y arbustos con raíces robustas (que actúen como decantadores naturales). La vegetación desfavorable es la fácilmente removible y que aumenta erosión del suelo.	Desfavorable	10
		Favorable	5
<i>Obstrucción de canales de drenaje</i>	Considerar si existen obras de contención de flujo (como piscinas decantadoras) u obstrucción del cauce por escombros, basura, troncos, otros	Importante obstrucción	10
		Moderada obstrucción	7
		Baja obstrucción	5
		No observado	1
		Sistema de contención	-5

Continúa en la siguiente página

Continuación de la tabla

<i>Antecedentes</i>	Información escrita y/u observación de depósitos de flujos en la unidad	Históricos	15
		Prehistóricos	10
		Sin antecedentes	5
<i>Índice de susceptibilidad (IS) máximo</i>			100

**Desglose de factores y ponderaciones para evaluación de susceptibilidad a remociones en masa tipo flujos, adaptado al área de estudio** (se pueden modificar las ponderaciones si los detalles no son suficientemente precisos. Del mismo modo, si en geología y geotecnia el volumen de detritos es bajo, se recomienda disminuir la ponderación a la del rango inferior).

<i>Factor</i>	<i>Rango</i>	<i>Detalle</i>	<i>Ponderación (%)</i>
<i>Pendiente canal de drenaje al pie de la ladera</i>	Alta	>25°	20
	Media	10-25°	10
	Baja	<10°	5
<i>Encajamiento canal de drenaje</i>	Alto	Profundidad/Ancho > 0.7	15
	Medio	P/A = 0.1-0.7	8
	Bajo	P/A <0.1	4
<i>Características geológicas-geotécnicas del material</i>	Muy favorable	Coluvios recientes o depósitos de remociones sueltas	25
	Favorable	Gravas y arenas sueltas con considerable contenido de finos	17
	Medianamente	Suelo granular de moderadas propiedades geotécnicas, poco compacto	13
	Poco favorable	Suelo granular de buenas propiedades geotécnicas	7
	Muy poco favorable	Roca alterada y fracturada	2
<i>Condiciones de humedad y saturación</i>	Muy favorable	Nivel freático (NF) < 3 m y saturación alta	15
	Favorable	NF = 3 m alta capacidad para almacenar agua	7
	Poco favorable	15 ≥ NF > 3 m y baja capacidad	3
	Muy poco favorable	NF > 15 m y saturación baja	2
<i>Cobertura vegetal</i>	Favorable	Presencia de vegetación desestabilizante que favorece erosión o fácilmente removible	7
	Medianamente	Sin presencia de vegetación que detenga remociones	3
	Desfavorable	Presencia de vegetación estabilizante	0
<i>Obstrucción de canal de drenaje</i>		Importante	8

Continúa en la siguiente página

Continuación de la tabla

	Moderada	4
	Baja	2
	No observado	0
	Sistema de contención	-5
<i>Antecedentes (Aluviones declarados en la hoya hidrográfica)</i>	Históricos frecuentes	10
	Históricos poco frecuentes	7
	Prehistóricos	4
	Sin antecedentes	0
<i>Índice de susceptibilidad (IS) máximo</i>		100



