



## ESTUDIO GEOLOGICO GEOTECNICO DEL ACUEDUCTO MEJILLONES - COMPAÑÍA MINERA. DETECCION DE RIESGOS NATURALES Y GEOLOGICOS

**Memoria de título para optar al grado de Geólogo Cristhian Andres Figueroa Moisan**

**Profesor Guía:** Mcs. Abraham Elías González Martínez  
**Profesores Comisión:** Prof. Ramiro Ulises Bonilla Parra  
Doc. Jorge Andrés Quezada Flory

### Resumen

El presente trabajo expone las características geológicas y geotécnicas de la superficie por donde pasa el trazado del acueducto agua salada Mejillones-Compañía Minera (MCM) en la segunda región de Antofagasta, Chile. Con un enfoque geológico ingenieril de los datos recopilados en terreno, se analiza la geomorfología del área de estudio y su relación con los riesgos naturales asociados. El análisis de riesgo sísmico y de precipitaciones, nos permite aumentar la certeza de su ocurrencia, para la instalación de refuerzos especiales a la tubería. Además, se realiza un análisis de pendiente para el trazado propuesto, identificando áreas de influencia para las quebradas mayores. Finalmente se exponen conclusiones y sugieren soluciones constructivas para el diseño de la línea de impulsión.

**Palabras Claves:** Geotecnia, Geología, Acueducto, Riesgo geológico, Riesgo Natural.

### 1.- Introducción

El proyecto “Acueducto de agua salada Mejillones-Compañía Minera” se encuentra ubicado en la localidad de Mejillones, segunda región de Antofagasta, el cual se extiende desde la costa por una distancia aproximada de 120 km de tubería, para finalizar en las instalaciones de la Compañía Minera, ubicada a 38 km al este de la localidad de Baquedano a 1.800 m.s.n.m. (Figura 1).

En una primera etapa, se realizó una evaluación geológica geotécnica de alternativas de trazado, para visualizar la más adecuada, posteriormente se identificó y evaluó las probabilidades de riesgos naturales y geológicos para el proyecto de ingeniería de detalle. Adicionalmente, se identificó todo tipo de atravesos que contemplan el trazado del acueducto y los tipos de materiales a excavar (Anexo 1). Los principales objetivos planteados en este estudio, son:

- Delimitar las unidades geomorfológicas.
- Definir unidades litológicas y tipos de suelo por tramos para su excavación.
- Identificar sectores vulnerables a fenómenos naturales e identificar el riesgo geológico.
- Identificar todos los atravesos e interferencias que deberán ser intervenidos con proyectos de ingeniería.



Figura 1. Ubicación del trazado proyecto acueducto MCM.

## 2 Marco Geológico Regional

El acueducto MCM cruza las siguientes formaciones geológicas, las cuales fueron extraídas de la carta geológica de Antofagasta (Figura 2).

### 2.1 Rocas Estratificadas

#### Jurásico

##### Formación Caleta Coloso (jksC)

Sedimentos conglomerádicos y areniscas rojas continentales con impregnaciones de yeso y sal. Corresponden a bancos conglomerádicos que están constituidos por rodados provenientes de lavas andesíticas porfíricas de la Formación La Negra y abundando en algunos horizontes, rodados de granodioritas.

#### Paleógeno

##### Formación La Portada (TTsm)

Secuencia de rocas sedimentarias marinas fosilíferas que afloran en la península de Mejillones.

Se caracteriza por areniscas, areniscas calcáreas, limolitas y coquinas en bancos horizontales a subhorizontales con abundante fauna de gastrópodos y pelecípodos. Incluye también, pero no en el perfil tipo, bancos lenticulares de diatomitas, fosforitas y yeso.

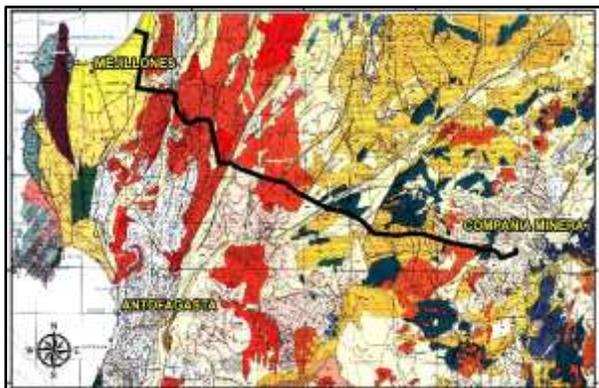


Figura 2. Carta geológica Antofagasta con trazado acueducto.

#### Pleistoceno

##### Formación Mejillones (Pltm)

Se define como Formación Mejillones a una secuencia de rocas sedimentarias marinas de 80 m de potencia que afloran en la zona norte de la planicie de la península de Mejillones, en bancos horizontales constituidos por areniscas, limolitas y coquinas. Presenta bivalvos y gastrópodos y corresponde a depósitos de plataforma costera, con presencia de paleo-costas concéntricas que indican

una marcada regresión hacia el norte. Su techo es la actual superficie de erosión.

#### Holoceno

##### Sedimentos coluviales y corrientes de barro, gravas y arenas (Hcol)

Los depósitos coluviales constituyen el mayor porcentaje de sedimentos recientes sin compactación e incluyen toda la escala granulométrica de tamaño en una masa caótica que se deposita en la base de todos los cordones topográficamente altos.

##### Sedimentos aluviales de relleno gravas, arenas y arcillas (Hal)

Son los sedimentos no consolidados de origen fluvial, aluvial, gravitacional y lacustre con o sin facies salinas, que existen en el área estudiada, constituidos por arenas, arcillas, limos, gravas, cenizas y sales indiferenciadas (facies de cloruros, sulfatos, nitratos, etc.) que se depositan como una cubierta delgada o con espesores de cierta importancia (20-40 m) en relleno de quebradas, depresiones o pie de monte. Las facies salinas de los salares, corresponden a concentraciones de yeso, anhidrita y sulfatos depositados por evaporación en cuencas cerradas.

### 2.2 Rocas Volcánicas

#### Jurásico

##### Formación La Negra (Jv)

Comprende potentes espesores de coladas de lavas y sedimentos clástico-volcánicos intercalados. Está constituida por lavas andesíticas porfíricas y afaníticas, en parte amigdaloidales y brechosas de color gris y verde con intercalaciones de areniscas continentales y brechas andesíticas de colores esencialmente rojizos.

#### Cretácico

##### Formación Augusta Victoria (Kv)

Está compuesta por coladas de lavas andesíticas porfíricas y afaníticas, en parte brechosa y amigdaloidales y que incluyen brechas casi conglomerádicas e ignimbritas y cuerpos hipabisales.

##### Formación Azabache (TTvi)

Secuencia de rocas volcánicas de lavas andesíticas en la base y lavas riolíticas hacia el techo. En parte aparece relacionada a domos riolíticos que podrían corresponder a conductos efusivos.

## 2.3 Rocas Intrusivas

### Jurásico Superior

#### Dioritas y Granodioritas (Jsg)

Las rocas que constituyen estos cuerpos corresponden a dioritas, granodioritas y monzonitas que intruyen a las rocas plutónicas asignadas al Paleozoico y a las volcánicas de la Formación La Negra.

### Paleógeno

#### Granitos (KTig)

Estas rocas graníticas y granodioríticas son, en general, de mineralogía muy homogénea aun cuando en algunos sectores presentan variaciones a dioritas.

## 3 Metodología

La metodología de trabajo consistió en dos campañas de terreno (7 días) para la captura de datos geológicos y geotécnicos, toma de muestras, recorrido e identificación del trazado y levantamiento fotográfico. Luego en la etapa de gabinete, se realizó el procesamiento y análisis de los datos, tablas y gráficos, confección de mapas e informe preliminar y final; además se generó una instancia de respuestas a preguntas y aclaraciones. La caracterización del trazado para el acueducto MCM, consistió en un recorrido total del área de estudio de 1.200 km<sup>2</sup> aproximadamente, para identificar los posibles trazados del acueducto MCM. Se utilizó una camioneta 4x4 y transectas locales a pie. Para el levantamiento de las coordenadas UTM de los puntos de control (PC), se utilizó GPS Garmin Serie Oregon modelo 550. En terreno los PC se identificaron mediante banderolas de color naranja y azul. EL análisis topográfico y de quebradas permitió discriminar distintas rutas para el diseño preliminar del trazado, donde la técnica utilizada fue la generación de una descripción de todas las interferencias para el trazado del acueducto.

Posteriormente se analizó en detalle el trazado más probable de ser ejecutado con la empresa mandante. A través de imagen satelital georeferenciada del área de estudio formato ASTER, se interpolaron las curvas de nivel del área para realizar un análisis de pendientes, cuencas y flujos de acumulación; mediante el software ArcGis.

## 4 Resultados

### 4.1 Geomorfología

Se presenta la descripción de las unidades geomorfológicas del área de estudio, por donde cruza el trazado del acueducto MCM, las cuales pueden clasificarse en tres grandes zonas y se ilustran en la figura 3.

#### 4.1.1 Zona Litoral

Corresponde al graben de Mejillones, zona hundida tectónicamente, que va desde la zona costera hasta aproximadamente la Ruta 1, se traduce en una superficie relativamente plana con una pendiente muy suave hacia la costa. El material superficial está constituido por coquinas y detritos coluviales pertenecientes a la Fm. Mejillones, que a medida que se acercan hacia el Este, van siendo más arenosas. En la zona del trazado alcanza una longitud cercana a los 15 Km.

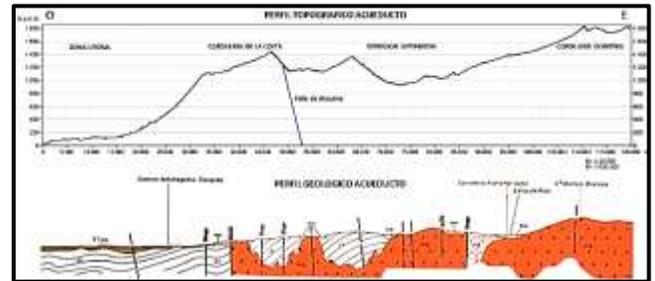


Figura 3. Sección topográfica de la geomorfológica y geología.

#### 4.1.2 Cordillera de La Costa

Geomorfológicamente corresponde a un bloque alzado tectónicamente, esta cadena montañosa está constituida principalmente por quebradas con rocas expuestas de coladas de lavas andesíticas de la Formación La Negra. En la zona del trazado alcanza una longitud cercana a los 55 Km.

**Quebrada Mejillones.** Corresponde a una quebrada de dirección Este-Oeste, con depósitos fluviotorrenciales y coluviales.

**Quebrada Mititus.** Corresponde a una quebrada en dirección Norte-Sur y es tributaria a la Quebrada Mejillones. Los materiales corresponden a depósitos fluviotorrenciales, aluvios y coluvios en todas las laderas que la conforman.

**Bloque Inter Quebradas.** Corresponde a un bloque levemente alzado entre quebradas, donde ambas, corresponden a fallas geológicas que permitieron el

alzamiento de este bloque. Posee una red de drenajes con pendientes pronunciadas de dirección Oeste. Los materiales corresponden a depósitos evaporíticos, principalmente a gravas, limos y afloramientos de roca.

**Borde Este de La Cordillera de la Costa:** es la parte más oriental de la Cordillera de la Costa, con una serie de quebradas de dirección Norte Sur y moderada pendiente al Este, limitada por la Falla de Atacama. Los materiales de esta zona, corresponden a depósitos de climas áridos y desérticos identificados como grandes áreas de limos y arcillas; además de depósitos coluviales y aluviales.

#### 4.1.3 Depresión Intermedia

En la zona del trazado alcanza una longitud cercana a los 50 Km. Esta depresión tectónica parte aproximadamente desde la falla de Atacama y continúa hasta llegar al yacimiento de la Compañía Minera, 35 km al este de la localidad de Baquedano, la podríamos subdividir en dos grandes zonas:

**Zona de Lechos Secos y Cerros Islas:** se observa una red de drenaje dendrítico con dirección NW y SW, hacia la cuenca central, estos lechos de ríos secos alcanzan los 150 m de ancho y se identifica cursos de aguas recientes. Sin embargo, no se observan flujos fluviotorrenciales, debido a su escasa pendiente.

**Zona de La Cordillera de Domeyko:** Corresponde a una serranía de orientación norte sur con altitudes promedios de 2.500 m.s.n.m. y constituye el rasgo geomorfológico más elevado del acueducto.

#### 4.2 Consideraciones geotécnicas de los suelos y tipos de depósitos.

Los depósitos sedimentarios no consolidados o suelos, representan la mayor proporción del proyecto de construcción del acueducto, es por eso que se describen sus características y consideraciones.

Estos se forman por la acción de procesos geomorfológicos y climáticos, destacando el medio de transporte y la meteorización. Con esta perspectiva, se clasifico los tipos de materiales de los depósitos que han sido identificados en la traza del acueducto; los cuales se relacionan con la granulometría, forma, tamaño, resistencia, composición química y propiedades mecánicas de los clastos, detritos y sedimentos constituyentes.

##### 4.2.1 Depósitos coluviales

Son materiales transportados por gravedad, la acción del hielo y deshielo y, principalmente, por el agua. Su origen es local, producto de la alteración *in situ* de las rocas (Fotografía 1) y posterior transporte como derrubios de ladera o depósitos de solifluxión. Frecuentemente están asociados a masas inestables. Su composición, depende de la roca del entorno, estando formados por fragmentos angulares y heterogéneos, generalmente de composición andesítica y granodiorítica del tamaño tipo gravas entre 2 a 64mm, englobados en una matriz limo arcillosa. Su espesor suele ser escaso entre 2 a 15m, aunque puede ser muy variable. La resistencia de estos materiales es baja, sobre todo en la zona de contacto con el sustrato rocoso, y cuando se desarrollan altas presiones intersticiales como consecuencia de lluvias intensas.



Fotografía 1. Vista al sur. Coluvio con afloramiento de andesita

##### 4.2.2 Depósitos aluviales

Son materiales transportados y depositados por el agua. El tamaño de los fragmentos o clastos varía desde la arcilla hasta las gravas gruesas, cantos y bloques (Fotografía 2). Se distribuyen en forma estratiforme, con cierta clasificación, variando mucho su densidad debido a la composición polimíctica de sus clastos. Están bien desarrollados en zonas de cauces, valles fluviales, abanicos, terrazas y paleo cauces. Son suelos muy anisotrópicos en su distribución, con propiedades geotécnicas altamente variables, las cuales están estrechamente relacionadas con la granulometría y permeabilidad.



**Fotografía 2. Vista al Este.** Aluvio

Su continuidad es irregular, pudiendo tener contenidos en materia orgánica en determinados niveles. Generalmente presentan un nivel freático alto.

#### 4.2.3 Depósitos litorales

Son materiales formados en la zona intermareal por la acción mixta de ambientes continentales y marinos, influyendo en este caso las corrientes, el oleaje y las mareas. Predominan las arenas finas y los limos con tamaños de grano entre 2 y 0.01mm pudiendo contener abundante materia orgánica y carbonato proveniente de coquinas (Fotografía 3). En general, la consistencia es blanda a muy blanda y anisotrópica. Pueden presentar encostramientos y poseen alta compresibilidad.



**Fotografía 3. Vista al Este.** Coquina, arena y limo.

#### 4.2.4 Depósitos de climas áridos y desérticos

Los ambientes áridos tienen implicaciones como la desecación profunda (Fotografía 4), la acumulación de sales y la alta movilidad de los sedimentos con el viento, entre sus propiedades destacan:

- Muy bajo contenido de humedad con suelos no saturados y succiones relativamente altas.
- Desarrollo de cementaciones por precipitación de sales.

- Suelos de origen eólico mal graduado generando una estructura muy suelta.

Bajo el punto de vista de la ingeniería geológica los principales problemas son:

- Expansividad en arcillas.
- Erosionabilidad muy alta.
- Ataques por sales, cloruros y sulfatos.
- Cambios volumétricos en yesos.



**Fotografía 4. Vista al Noreste.** Depósito de clima árido y desértico

#### 4.2.5 Depósitos evaporíticos

Estos depósitos están formados por la precipitación química de sales, cloruros o sulfatos, típicos de medios áridos o desérticos (Fotografía 5). Las características comunes a estos depósitos son:

- Producen reacciones químicas con los hormigones, que pueden ocasionar su deterioro y destrucción.
- Son fácilmente solubles, sobre todo los cloruros.
- Pueden sufrir cambios de volumen, al pasar las anhidritas a yesos.
- En superficie forman costras.
- Representan un riesgo de hundimiento cuando se producen fenómenos de disolución y carstificación.



**Fotografía 5. Vista al Norte.** Depósito evaporítico

## 5 Características de Peligrosidad y Riesgo

Para evitar o reducir los riesgos geológicos e incorporar la influencia de estos en el diseño e intervención del terreno, es necesaria la evaluación de la peligrosidad y del riesgo.

La peligrosidad se refiere al proceso geológico, el riesgo a las pérdidas. La peligrosidad,  $P$  hace referencia a la frecuencia de ocurrencia del proceso en un lugar. Se define como la probabilidad de ocurrencia de un proceso de un nivel de intensidad o magnitud determinado, dentro de un periodo de tiempo dado y dentro de un área específica (Vames, 1984; Barbat, 1998).

Para su evaluación es necesario conocer:

- Donde y cuando ocurrieron los procesos en el pasado.
- La intensidad y magnitud que tuvieron.
- Zonas en que pueden ocurrir procesos futuros.
- La frecuencia de ocurrencia.

La peligrosidad también se puede expresar a partir del periodo de retorno  $T$  (años transcurridos entre 2 eventos), que es la inversa de la probabilidad anual de excedencia.

$$p = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^t$$

El concepto de riesgo, incorpora consideraciones socio-económicas, y se define como las pérdidas potenciales debidas a un fenómeno natural determinado.

### 5.1 Riesgo Sísmico

Barbat (1998) define el riesgo sísmico como las pérdidas esperadas que sufren las estructuras durante el lapso de tiempo que permanecen expuestas a la acción sísmica. El riesgo se evalúa a partir de la peligrosidad correspondiente a un determinado proceso y de los efectos del mismo sobre los elementos expuestos al peligro. El riesgo está referido, como la peligrosidad a un periodo de tiempo determinado, el cual puede calcularse.

En el análisis de la base de datos de sismos de los últimos 100 años (USGS), con epicentros en el área cercana al acueducto MCM, con un radio de búsqueda de 200 km para eventos telúricos con magnitudes superiores a 5.5° Richter (Grafico 1), se puede observar que los sismos son generados por el desplazamiento de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana y se han registrado dos eventos

superiores a 8° Richter, cuyos epicentros son 15 km al sur oeste y 170 km al este del acueducto MCM.

Con el análisis de los datos se determinó que la probabilidad de excedencia o peligrosidad de un evento magnitud superior a 8° Richter con una vida útil del proyecto de 50 años y tasa de retorno de 72 años, es 50.3 %; y para una tasa de retorno de 100 años, es 39.5%.

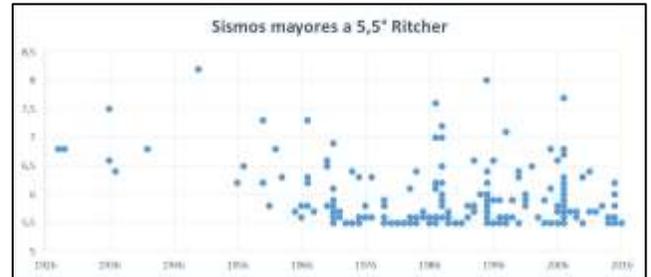


Gráfico 1. Sismos mayores a 5,5° Richter en los últimos 100 años

### Sistema de Falla Atacama (SFA)

La falla Mejillones, ubicada al pie del Morro Mejillones y perteneciente al sistema de falla Atacama (SFA), tiene una longitud total de 25 km y rumbo N5°E a N15°E con buzamiento 60°E. Métodos indirectos permitieron calcular la tasa de alzamiento de la costa del norte de Chile cuyo rango se sitúa entre 0,1-0,2 m/ka (Ortlieb et al., 1996; Marquardt et al., 2005; Victor et al., 2011).

Por otra parte, a lo largo del borde oriental de la Cordillera de la Costa, se han producido escarpes de falla, donde estructuras regionales formaron un escalón morfológico entre 100 a 250 m de altura, cuyo borde es un amplio piedemonte, conformado por abanicos aluviales.

El acueducto propuesto intercepta dos zonas estructurales del SFA. En primer lugar, el tramo comprendido por la quebrada Mititus, correspondiente a 2.6 km de una estructura de falla rumbo N20°E, donde conos aluviales cortados en superficie por la traza de la falla, evidencian actividad reciente. En segundo lugar (Fotografía 6), el tramo del borde oriental de la Cordillera de la Costa, en el que un escarpe de falla con una altura de 20 m, aflora en el kilómetro 48 de la línea de impulsión.

Dado este escenario y teniendo en cuenta la probabilidad de ocurrencia de actividad sísmica en el transcurso de la vida útil del proyecto, se recomienda que el diseño contemple, refuerzos especiales y mecanismos para la adecuada dilatación y deformación del acueducto.



Fotografía 6. Vista al Oeste. Escarpe de Falla (SFA).

### 5.2 Riesgo de Precipitaciones.

De la misma manera cómo se analizó el riesgo sísmico, se realizó el análisis de la base de datos de las precipitaciones de los últimos 60 años en las estaciones meteorológicas de Antofagasta y Baquedano. Se consideró una tasa de retorno, para eventos climáticos de lluvia máxima por 24 hr superiores a 15 mm/día (Gráfico 2), los cuales podrían desencadenar aluviones y corrientes de barro en zonas con mayor pendiente.

El cálculo de la probabilidad de peligrosidad que un evento meteorológico de precipitación superior a 15 mm/día con una tasa de retorno de 15 años y vida útil de 50 años, es 96.8 %.

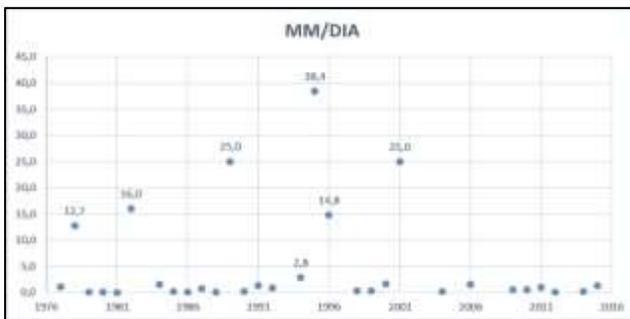


Gráfico 2. Precipitaciones máximas en 24hrs por año

### 5.3 Análisis de Pendientes y Quebradas.

Con las curvas de nivel del área de estudio se realizó un análisis de pendientes a través del software ArcGis, como se muestra en la Figura 4; la cual indica en naranja los ángulos mayores a 35°; en amarillo los ángulos mayores a 20°; y en verde los ángulos menores a 20°. Con esta información se puede interpretar que las zonas más expuestas y por ende de mayor riesgo a tener deslizamientos de roca o aluviones por precipitaciones, serán las quebradas y piedemontes que se encuentren en el área de influencia de pendientes mayores a 20°.

Por otro lado, las quebradas definidas con ángulos menores a 20° y poseen pequeña área portante, presentan un caudal muy bajo, por lo que sólo

gatillaran escurrimientos superficiales y arrastre de material suelto, la velocidad de escurrimiento en las quebradas menores no es suficiente para provocar una socavación de importancia, ni poner en peligro el acueducto.

Pese a lo anterior, se recomienda considerar protecciones para la tubería de al menos 1 metro bajo el nivel de terreno para quebradas menores. Esto se debe a que, aunque se haya observado que el riesgo de aluviones tiene un alto período de retorno, es muy probable su ocurrencia en la zona y, debido a las incertidumbres en las variables involucradas es conveniente tomar un resguardo prudente.

La mayor socavación se presentará en las quebradas que tengan mayor pendiente y en las secciones donde se presente un cauce claramente definido, donde se genere un área mojada pequeña.

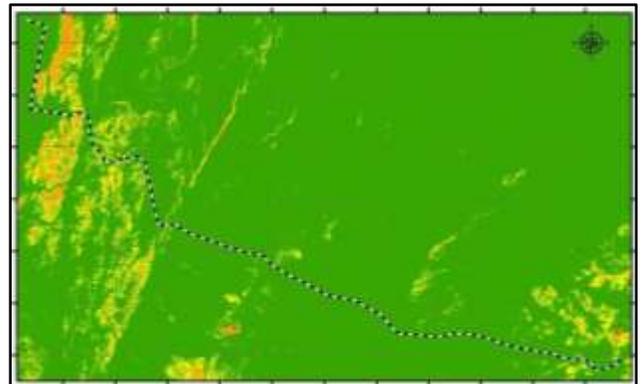


Figura 4. Mapa Pendientes Acueducto MCM.

### 6 Tipos de materiales a intervenir.

En base al análisis geológico, geotécnico y geomorfológico del área de estudio, donde pasa la traza del acueducto MCM y mediante puntos georeferenciados, imagen satelital, toma de muestras y fotografías digitales se confecciono Tabla N°1. De la cual se puede extraer la siguiente información:

Tabla 1. Cuantificación de cobertura de materiales a excavar

Tipo de Material	Km	Porcentaje	Excavacion	%
roca	4,26	3,6	Excavacion en Roca	4,6
roca/bloques	1,19	1,0		
arena/coquina	2,89	2,4		
grava	7,32	6,2	Excavacion en Suelo	95,4
grava/limo	57,3	48,2		
aluvio/bloques	0,31	0,3		
aluvio/gravas	3,64	3,1		
grava/bloques	25,34	21,3		
coluvio	16,54	13,9		

Los materiales a remover para la confección de la trinchera del acueducto, son 95.4% del trazado o su equivalente de 114,5 km lineales de suelo o sedimentos no consolidados como grava, arena, limo; y un 4.6% en roca como andesita y granodiorita que equivalen a 5,5 km lineales de afloramiento del macizo rocoso.

A continuación, se describen las características del tipo de material a ser excavado, como se ilustra en la figura 5.

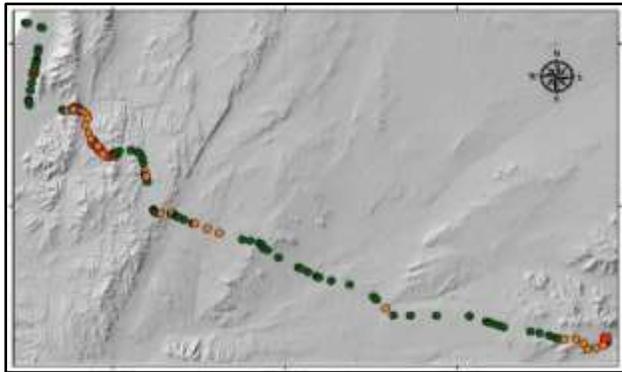


Figura 5. Clasificación de los materiales en el trazado.

**Limo:** Es un sedimento fino suelto con granulometría comprendida entre la arena fina y la arcilla. Es transportado en suspensión por los ríos y el viento, que se deposita en el lecho de los cursos de agua o sobre los terrenos que han sido inundados. El diámetro de las partículas de limo varía de 0,002 mm a 0,06 milímetros.

**Arena:** Es un conjunto de partículas de rocas disgregadas. En geología se denomina arena al material compuesto de partículas cuyo tamaño varía entre 0,063 y 2 milímetros.

**Coquina:** Es una roca sedimentaria de origen bioquímico perteneciente a las rocas calizas, compuesta de agregados no consolidados, pobremente cementados, de conchas y corales. La coquina corresponde a sedimentos compuestos principalmente por caparzones calcáreos de organismos marinos.

**Aluvio:** Es un material detrítico transportado y depositado transitoria o permanentemente por una corriente de agua, que puede ser repentina y provocar inundaciones. Está compuesto por arena, grava, limo y bloques. Se acumula en los canales de las corrientes, en las planicies inundables y en los deltas. También incluyen bajo este término los materiales que se sedimentan

en lagos o estuarios. El término aluvión se refiere a material no consolidado.

**Coluvio:** Depósito de material detrítico acumulado en la parte inferior de una vertiente, escarpe o piedemonte. A diferencia de los aluviones, el material no ha sufrido en ellos más que un corto transporte.

**Grava:** Son acumulaciones de fragmentos variables de rocas de tamaño comprendido entre 2 y 64 mm. Se originan por el desgaste natural producido por el movimiento en los lechos de ríos pudiendo generar formas redondeadas, pasando a conocerse como canto rodado.

**Bloques:** Fragmentos de roca mayor que están sueltos, de modo que pueden ser movidos por procesos mecánicos naturales como las corrientes de agua, los movimientos de tierra o la fuerza de gravedad en las laderas suficientemente inclinadas. El diámetro de los fragmentos de roca es mayor a los 25cm alcanzando dimensiones en terreno de hasta 2.5 metros de diámetro en el eje de mayor extensión. Estos corresponden a rodados y fragmentos in-situ.

**Roca:** Afloramiento superficial del macizo rocoso compuesto principalmente por rocas tipo andesitas y granodioritas.

### 6.1 Caracterización Geotécnica del Macizo Rocos

#### Zona Occidental Cordillera de la Costa (Litoral)

Moderadamente meteorizada Grado III

Resistencia entre R3 a R4. Roca medianamente fuerte a fuerte. RQD 45% - 55%. Separación Juntas 0.06 - 0.2 m. Longitud 1 - 3 m. Apertura 1 - 5 mm. Rugosidad ondulada. Relleno blando < 5 mm (arcillas, clorita, epidota). Moderadamente alterada. Agua Freática: Seco. Dirección y Buzamiento: Favorables

Valoración RMR: 41

Valoración GSI: Rango entre 36 - 46

#### Zona Central Cordillera de la Costa (Quebradas)

Levemente meteorizada Grado II

Resistencia entre R4 a R5. Roca fuerte a muy fuerte. RQD 55% - 65%. Separación juntas 0.06 - 0.2 m. Longitud 3 - 10 m. Apertura 0.1 - 1.0 mm. Ligeramente rugosa. Relleno blando < 5 mm (arcillas, clorita, epidota). Moderadamente alterada. Agua Freática: Seco. Dirección y Buzamiento: Favorables

Valoración RMR: 55

Valoración GSI: Rango entre 50 - 60

Estos valores de RMR corresponden a un macizo rocoso de regular calidad geotécnica o Clase III, cuyos parámetros de corte Mohr-Coulomb del defecto, se establecen entre 200 a 300 kPa para la cohesión y entre 25°- 35° para el ángulo de fricción.

## 7 Descripción de las obras Projectadas

La línea de impulsión de agua de mar considera una longitud de 120 km con diámetro de 30 pulgadas. Este sistema contempla una estación de captación en la bahía Mejillones y tres estaciones de bombeo intermedias. Cada estación se encargará de impulsar un caudal nominal de agua de mar de 600 l/s hacia la siguiente estación, hasta llegar a la piscina de almacenamiento en la planta de sulfuros de la Compañía Minera. La captación incluirá una batería de filtros para el tratamiento del agua de mar, mientras que cada estación contará con su respectivo estanque de traspaso.

## 8 Comentarios y Conclusiones.

No hay cauces de consideración que se vean afectados por el acueducto MCM. En toda el área los cauces corresponden a cursos menores y que la mayor parte del tiempo se encuentran secos. Los cursos de agua con mayor extensión corresponden a la Quebrada Mejillones y a la Quebrada San Cristóbal.

Los registros hidrológicos establecen que el régimen de precipitaciones en la comuna de Mejillones y Baquedano es escaso, presentando como comportamiento promedio una media anual de 6 mm. La escorrentía superficial es prácticamente nula debido a los bajos índices de precipitación. Sin embargo, a pesar de las características de desierto semiárido que posee la comuna de Mejillones, se distinguen tres quebradas de importancia en el sector; éstas corresponden a la Quebrada de Mejillones, Quebrada Naguayán y Quebrada San Cristóbal, las que se encuentran generalmente secas, salvo en eventos pluviométricos extremos que permiten conducir flujo aguas abajo. La zona de riesgo ante fenómenos de socavación, corresponde al cruce de la tubería bajo el fondo del cauce; como se muestra en la Figura 6.

La tasa de retorno asociado a fenómenos aluviales en el área de estudio es de 20 años, lugar donde se presentan episodios de intensas lluvias con duración menor a 12 horas.



Figura 6. Mapa de riesgo pendiente y aluviones.

Para minimizar los riesgos ambientales y de operación, se recomienda como metodología constructiva, realizar excavación bajo la profundidad de socavación que indique el estudio respectivo. A modo de referencia es posible realizar una estimación de acuerdo a los niveles de socavación con atraveso de tubería, que han experimentado otros proyectos con cruces de quebradas, cercanas a la zona de estudio, las cuales se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2. Socavación estimada por quebrada

Quebrada	A <sub>p</sub> (km <sup>2</sup> )	Socavación (m)
Mejillones	420	4,0
Valenzuela	240	1,0
Seca	535	2,0
Tres Puntas	39	1,5
Pampa Barrancas	440	1,5
San Cristóbal	3300	2,5

Según estos estudios y la experiencia del consultor, es posible estimar una socavación máxima aproximada de 4 metros para las quebradas con mayor área portante, lo cual debe ser corroborado con un estudio más detallado de socavación en los cruces. Esto debido a que los estudios antes mencionados sólo deben ser considerados como referencia, ya que la socavación depende directamente de la sección del cauce en el punto a intervenir, así como del tipo de suelo y granulometría del lecho, pudiendo variar considerablemente a lo largo del desarrollo de la quebrada.

Para realizar un estudio completo de socavación de quebradas se requiere la mecánica de suelos del

lecho y la topografía en detalle de cada cauce a intervenir.

Además, se recomienda considerar protecciones de diseño para la tubería, con norma sismo resistente establecida para sismos magnitud 8 grados Richter. Esto se debe a que, aunque se piensa que el riesgo de sismos con esa magnitud tiene un alto período de retorno, es probable su ocurrencia en la zona durante la vida útil del acueducto, por lo que es conveniente tomar un resguardo prudente.

En el trazado se recomiendan hacer prospecciones geotécnicas basadas en calicatas espaciadas cada 500 m y en otros casos cada 1.000 m con profundidades de 3 m, lo que da un total de 161 calicatas.

Para las estaciones de bombeo realizar cuatro calicatas en cada una y en la captación de agua, realizar dos calicatas profundas o dos sondajes cortos (10m) hasta alcanzar los materiales del tipo coquina.

## Referencias

- Figueroa C. 2012. Estudio geológico y geotécnico conceptual acueducto de agua salada Mejillones – Compañía Minera. Detección de riesgos naturales y geológicos. Informe de trabajo Geoinvestment Spa. Santiago de Chile. (Inedito).
- González de Vallejo L.; Ferrer M., Ortuno L., Oteo C. 2002: Ingeniería Geológica. Pearson Educación. Madrid.
- José González-Alfaro, Gabriel Vargas, Gabriel González, Luc Ortlieb, Sylvain Bonvalot, Germinal Gabalda, Gabriel Álvarez, Byron Huerta y Javiera Valdenegro. 2015. Evidencias del MIS 3 en la Península de Mejillones y su implicancia dentro de un contexto geomorfológico, estructural y de grandes terremotos de subducción. XIV Congreso Geológico Chileno, La Serena.
- Hoja Antofagasta, Región de Antofagasta. Escala 1:250.000 Carta N°30. 1978.
- Pro Pipe S.A. Estudio de prefactibilidad sistema de abastecimiento agua de mar. 2012 (Inedito).
- <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>
- <https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/reportes>



# ANEXO 1

## Interferencias y tipos de suelo por tramos a intervenir

Punto GPS	Coord. UTM	Altitud	Interf 1	interf 2	interf 3	tipo de suelo	kilometraje	Tramo	distancia lineal Km	observacion	Fotografias Sector
ALB-1	362311 7453189	7,4	Inicio Acueducto	C. Tierra							
ALB-2	362459 7453141	30,0	Desnivel			arena/coquina	2,89			6 calicatas	
ALB-3	362679 7453162	32,1	Pto. Inflexion								
ALB-4	364612 7452520	79,5	C. Tierra	Ruta - 1							
ALB-5	364807 7452450	80,6	Pto. Inflexion	Alta Tension	C. Tierra						
ALB-6	364243 7449252	87,4	C. Tierra								
ALB-7	364144 7448619	94,0	C. Tierra								
ALB-8	363940 7447435	98,0	C. Tierra			Escombros de Talud	6,80	Zona Litoral	19,97	13 calicatas	
ALB-9	363914 7447322	98,8	C. Tierra								
ALB-10	363886 7447173	98,1	C. Tierra								
ALB-11	363852 7446967	97,9	C. Tierra								
ALB-12	363758 7446497	101,6	C. Tierra								
ALB-13	363571 7445543	104,8	Afloramiento Roca			roca	0,38				
ALB-14	363527 7445118	112,0	Cono Deyeccion								
ALB-15	363277 7443959	112,7	Pto. Arqueologico								
ALB-16	363047 7442778	112,7	Pto. Arqueologico								
ALB-17	362829 7441353	121,8	Alta Tension	Alta Tension	Alta tension						
ALB-18	362812 7441233	121,9	Gasoducto			Escombros de Talud	9,90			20 calicatas	
ALB-19	362807 7441183	124,5	Fin Alta Tension								
ALB-20	362801 7441108	122,1	Gasoducto								
ALB-21	362947 7440591	125,4	B-243								
ALB-22	362939 7440545	129,2	Pto. Inflexion								
ALB-23	367727 7439769	217,0	Portezuelo								
ALB-25	368454 7439556	280,3	Cono Deyeccion								
ALB-26	369080 7439745	303,2	Quebrada			coluvio	1,72			3 calicatas	
ALB-27	369345 7439858	330,7	Ladera Cerro Pend. 30°								
ALB-83	369495 7439921	373,7	Ladera Cerro Pend. 30°								
ALB-28	369558 7439928	347,6	Quebrada								
ALB-29	369733 7439955	339,1	Zona Drenaje 170mt			roca	0,84	Quebrada Mejillones	3,13	Excavacion en Roca	
ALB-30	369868 7439949	337,2	Fin Ladera Cerro								
ALB-34	370127 7439738	337,0	Cono Deyeccion								
ALB-31	370327 7439707	359,4	Lecho Seco de Rio								
ALB-35	370347 7439652	357,1	Cono Deyeccion			coluvio	0,57			1 calicata	
ALB-36	370674 7439574	369,2	Cono Deyeccion								
ALB-32	371186 7439110	406,3	Quebrada	Falla							
ALB-84	371419 7438471	447,6	Quebrada	Falla							
ALB-56	371045 7437434	503,8	Estanque 2 Sierra Miranda	Falla		coluvio	4,84	Quebrada Mititus	2,66	Refuerzo con flexibilidad	
ALB-57	371115 7436154	587,7	Quebrada								
ALB-85	371807 7435304	663,7	Quebrada								
ALB-86	372144 7434893	708,9	Quebrada			roca	1,31				
ALB-87	372277 7434594	735,8	Quebrada								
ALB-48	372660 7434384	791,8	Estanque 2 Sierra Miranda	C. Tierra		coluvio	0,74			1 calicata	
ALB-88	372817 7434209	792,2	Quebrada								
ALB-89	373107 7433692	842,3	Quebrada			roca	0,90				
ALB-90	373605 7432958	921,8	Quebrada			coluvio	0,88			1 calicata	
ALB-91	374428 7432685	1003,0	Quebrada			roca	0,35				
ALB-92	375339 7432894	1082,2				grava	0,55				
ALB-46	375355 7432940	1081,8									
ALB-93	375357 7432971	1070,1									
ALB-94	375345 7433024	1081,6	Labores Mina Sorpresa			roca	0,48	Cordillera de la Costa	23,5	Analisis Cambio Linea Trazado	
ALB-95	375308 7432756	1094,4									
ALB-45	376003 7433426	1114,0	Estanque Mina S. Miranda								
ALB-58	377638 7433560	1090,7	Llano Inter Montana								
ALB-96	378614 7433263	1145,3	Lomaje Suave			grava	5,61			11 calicatas	
ALB-97	378945 7433079	1128,9	Lomaje Suave								
ALB-98	379281 7432355	1151,2	C. Tierra								
ALB-99	379444 7431622	1195,8	Lomaje Suave								
ALB-100	379728 7430309	1219,9	Quebrada								
ALB-101	379685 7429669	1241,4	Escarpe			coluvio	2,17			Cambio Linea Trazado	
ALB-102	379751 7429573	1238,0	C. Tierra								
ALB-103	379899 7429481	1241,6	C. Tierra								
ALB-104	380059 7428996	1272,5	Planicie			Escombros Talud	5,17			4 calicatas 5 calicatas	
ALB-105	380928 7424434	1393,8	Lomaje Suave			grava/limo	1,40			3 calicatas	
ALB-106	381014 7424168	1395,2	Lomaje Suave								
ALB-107	381299 7423906	1419,5	Quebrada								
ALB-108	381997 7423798	1336,1	Quebrada			coluvio	1,76			3 calicatas	
ALB-109	383474 7423822	1192,2	Quebrada								
ALB-110	383581 7423918	1202,7	Falla de Atacama								
ALB-111	384085 7423516	1156,9	C. Tierra	Alta Tension							
ALB-112	384403 7423302	1132,1	C. Tierra	Cañeria?		grava	1,16				
ALB-113	384560 7423221	1149,3	Lomaje Suave								
ALB-114	385352 7422822	1171,7	Lomaje Suave								
ALB-115	386618 7422312	1155,9	C. Tierra			grava/limo	2,65				
ALB-116	386756 7422305	1160,8	C. Tierra	Alta Tension							
ALB-117	386968 7422273	1168,7	C. Tierra								
ALB-118	388746 7421498	1159,8	Quebrada			coluvio	3,86			8 calicatas	
ALB-119	390522 7420813	1120,5	Quebrada	C. Tierra							
ALB-120	393847 7419822	1247,9	Quebrada								
ALB-121	395004 7419601	1312,6	Zona Drenaje								
ALB-122	396285 7419270	1363,6	Lomaje Suave								
ALB-123	396524 7419098	1359,9	Quebrada								
ALB-124	396689 7418666	1328,4	Quebrada								
ALB-125	396983 7418438	1306,0	Quebrada								
ALB-126	397469 7418151	1273,3	Quebrada								
ALB-127	399102 7417010	1163,1	Quebrada								
ALB-128	401947 7415594	999,1	Pampa			grava/limo	27,15	Depresion Intermedia	69,53	27 calicatas	
ALB-129	402310 7415314	980,1	Cañeria								
ALB-130	403329 7414792	962,6	Pto. Arqueologico?								
ALB-131	404619 7414110	922,1	Cañeria								
ALB-132	404827 7414004	927,8	2 Alta Tension	2 Cañeria	Ruta-6						
ALB-133	404984 7413918	923,3	Linea Ferrea								
ALB-134	406737 7413431	958,8	Pampa Calichera								
ALB-135	409366 7412846	1066,9	Lomaje Suave								
ALB-136	412851 7411010	1021,6	Planicie								
ALB-137	413322 7410510	1042,4	Linea Ferrea								
ALB-138	414655 7409193	1072,7	Qda. San Cristobal	Lecho de rio		aluvio/bloques	0,31			Refuerzo cimentacion	
ALB-139	415768 7408087	1137,3	Lomaje Suave	Pto Inflexion							
ALB-140	418196 7408061	1207,9	Quebrada								
ALB-141	422016 7408024	1305,7	Quebrada								
ALB-142	426795 7407967	1390,4	Quebrada								
ALB-143	429228 7407164	1433,0	Planicie								
ALB-144	429678 7407013	1441,5	Quebrada								
ALB-145	430071 7406882	1449,4	Quebrada								
ALB-146	430969 7406570	1475,4	C. Tierra			grava/limo	26,10			26 calicatas	
ALB-147	431734 7406314	1498,1	Planicie								
ALB-148	435640 7405620	1610,0	Quebrada								
ALB-149	436976 7405394	1656,3	Quebrada								
ALB-150	438331 7405000	1747,7	Quebrada	Ladera Cerro							
ALB-151	439142 7404721	1797,1	Quebrada	Lomaje Suave							
ALB-152	439634 7404540	1834,7	Quebrada	Ladera Cerro							
ALB-153	440544 7404433	1765,5	Quebrada			aluvio/grava	3,64			7 calicatas	
ALB-154	442275 7404431	1799,4	Piedemonte								
ALB-155	443380 7403819	1762,4	C. Tierra	Ladera Cerro							
ALB-156	443982 7402903	1729,9	Piedemonte								
ALB-157	445194 7403077	1746,3	C. Tierra								