

# ALTO MAIPO

## **PROGRAMA DE MONITOREO DE VIBRACIONES POR TRONADURAS EN TÚNEL EL VOLCÁN, ETAPA II**

– Febrero de 2017 –

**Programa de Monitoreo de Vibraciones por Tronaduras en Túnel El Volcán, Etapa II****ÍNDICE**

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS Y ALCANCE .....</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>ANTECEDENTES GENERALES .....</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>PROPUESTA METODOLÓGICA.....</b>	<b>8</b>
<b>4.1</b>	<b>MONITOREO DE VIBRACIONES .....</b>	<b>8</b>
<b>4.1.1</b>	<b>Lugar .....</b>	<b>8</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Procedimiento y análisis .....</b>	<b>9</b>
<b>4.1.3</b>	<b>Fecha estimada de ejecución de las actividades de terreno.....</b>	<b>12</b>
<b>4.1.4</b>	<b>Normativa aplicable.....</b>	<b>13</b>
<b>4.1.5</b>	<b>Medidas en caso de superación de la norma.....</b>	<b>13</b>
<b>4.2</b>	<b>DETERMINACIÓN DE VARIACIÓN DE VOLUMEN Y SUPERFICIE DE GLACIARES .....</b>	<b>14</b>
<b>4.2.1</b>	<b>Área de estudio .....</b>	<b>14</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Procedimiento y análisis .....</b>	<b>15</b>
<b>4.3</b>	<b>ANÁLISIS HISTÓRICO DE LA EVOLUCIÓN DE LA SUPERFICIE DE GLACIARES .....</b>	<b>15</b>
<b>5</b>	<b>INFORMES .....</b>	<b>16</b>
<b>6</b>	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>16</b>

## **1 INTRODUCCIÓN**

Alto Maipo SpA se encuentra en fase de construcción del Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo (PHAM), ubicado en la comuna de San José de Maipo, región Metropolitana de Santiago, el cual contempla la construcción de dos centrales hidroeléctricas de paso y su respectiva red de túneles para el transporte de agua.

Actualmente, las excavaciones se desarrollan en distintos frentes de avance mediante tuneleras (TBM, por sus siglas en inglés) y mediante excavación controlada por perforación y tronadura (D&B, por sus siglas en inglés).

A partir del año 2015, Alto Maipo se encuentra ejecutando el Programa de monitoreo de vibraciones y modelo de atenuación temprano (o también denominado como primera etapa de monitoreo o etapa I) con el objeto de evaluar de forma adelantada el nivel de vibraciones en superficie inducidas por actividades de D&B al inicio de la construcción del Túnel El Volcán. Este programa temprano comprende la realización del monitoreo de vibraciones en dos tramos: El primero localizado a partir del Pk 500, ya ejecutado entre el 28 de diciembre de 2015 y 10 de febrero de 2016; y el segundo, localizado a partir del Pk 2000, a realizarse aproximadamente entre julio y diciembre de 2017.

El presente documento, que viene a complementar la etapa temprana de monitoreo de vibraciones por tronaduras, corresponde a la etapa II del programa de monitoreo de vibraciones por tronaduras durante la construcción del túnel El Volcán. Esta segunda etapa incorpora el monitoreo de vibraciones en un tramo más avanzado del túnel El Volcan, aproximadamente a partir el Pk 3500, en una extensión de aproximadamente 200 m, localizado próximo a la frontera de la sección de túnel que se encuentra bajo el Monumento Natural El Morado, que incia aproximadamente en el Pk 4200.

Junto con la medición de vibraciones se incorpora una campaña de levantamiento LIDAR (Light Detection and Ranging) sobre los glaciares localizados al interior del “Monumento Natural El Morado” y los pertenecientes al sitio Prioritario “El Morado” que comparten divisoria de cuenca con el Monumento Natural, programada a ser realizada entre el 6 de marzo y el 7 de abril de 2017, mismas fechas el 2018 y en función de los resultados eventualmente repetir el levantamiento el 2019. Campañas cuyo objetivo básico es establecer las variaciones de volumen y de superficie en los glaciares del área de estudio señalada. Asimismo, esta segunda etapa de monitoreo también incorporará entre sus resultados el análisis histórico de evolución de la superficie de los glaciares del área de estudio entre los años 1955 y 2016, y su eventual relación con variables climáticas.

## **2 OBJETIVOS Y ALCANCE**

El Programa de monitoreo de vibraciones por tronaduras etapa II considera los siguientes objetivos:

- **Realizar el monitoreo de vibraciones por tronaduras en una sección cercana al MN El Morado y elaborar un modelo de atenuación de vibraciones en función de la distancia**

Debido a la naturaleza de las excavaciones que se llevan a cabo en un frente de trabajo del Túnel El Volcán, y para dar seguimiento ambiental del proyecto en cumplimiento a lo definido en la sección 7.3.5 de la Resolución Exenta [1], donde se detalla que se debe implementar un programa de monitoreo de vibraciones de tronaduras previo al inicio de la construcción del túnel bajo el Monumento Natural El Morado (MN El Morado), Alto Maipo ha solicitado a la empresa E-Mining Technology S.A. el desarrollo de un modelo de atenuación de vibraciones en base al monitoreo de vibraciones asociadas a actividades de D&B. El objetivo de este modelo es la evaluación del nivel de vibraciones que se podrían desarrollar en la superficie del terreno, y validar el supuesto del nulo o imperceptible efecto asociado a las actividades de tronadura en una sección cercana (o frontera) del MN El Morado, en particular sobre las estructuras glaciares presentes en el área del Monumento.

El programa en esta etapa II comprende el monitoreo de tronaduras en una sección del Túnel El Volcán, ubicada a partir del kilómetro 3,5 de construcción del frente de D&B. En ese tramo se realizará el monitoreo de vibraciones durante un período de un mes, o el correspondiente a un avance aproximado de 200 m mediante la utilización de sensores instalados tanto en superficie como dentro del túnel.

Con la información recolectada mediante el programa de monitoreo de vibraciones, se validará un modelo de atenuación temprano para el tramo, que servirá para estimar el nivel de vibraciones en la superficie del terreno producto de las actividades de D&B ejecutadas dentro del Túnel, para un área que es cercana a la estructura glaciar más próxima al túnel.

Esta información se complementará, según corresponda, con los resultados obtenidos del “Programa de monitoreo de vibraciones y modelo de atenuación temprana Túnel El Volcán”, actualmente en ejecución.

- **Determinar variaciones volumétricas y de superficie en los glaciares existentes al interior del Monumento Natural El Morado y los glaciares del Sitio Prioritario El Morado que comparten divisoria de cuenca con el Monumento Natural**

Este objetivo considera la determinación de cambios de volumen y de superficie en los glaciares existentes al interior del Monumento Natural El Morado y aquellos del Sitio Prioritario El Morado que comparten divisoria de cuenca con el Monumento Natural, mediante la realización de dos campañas de levantamiento LIDAR a realizarse entre el 6 de marzo y el 7 de abril de los años 2017 y 2018, y en función de los resultados se evaluará su repetición el año 2019.

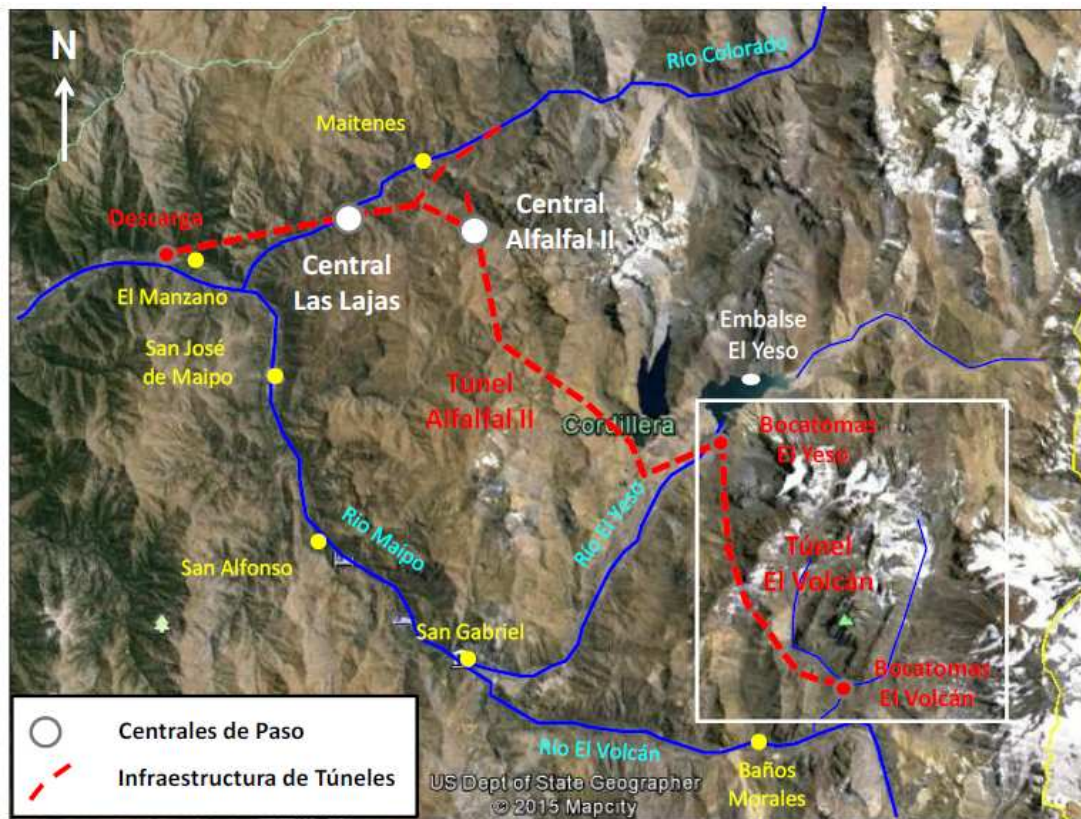
- **Analizar la variación histórica en superficie de los glaciares al interior del Monumento Natural El Morado y los glaciares del Sitio Prioritario El Morado que comparten divisoria de cuenca con el Monumento Natural**

Se realizará el análisis variación histórica de la superficie de los glaciares en estudio sobre la base de la comparación de información histórica disponible de sensores remotos (fotografías aéreas e imágenes satelitales de alta resolución) entre los años 1955 y 2016. Mediante este análisis se espera establecer el patrón general de evolución de la superficie de los glaciares en estudio durante las últimas décadas, su relación con algunas variables climáticas relevantes, y el análisis durante el período de construcción del PHAM.

### 3 ANTECEDENTES GENERALES

El proyecto hidroeléctrico Alto Maipo se ubica en el sector del Cajón del Maipo, al sureste de Santiago, Región Metropolitana, y contempla la construcción de dos centrales hidroeléctricas de paso y su red asociada de aproximadamente 70 km de túneles, que servirán para el transporte de agua desde bocatomas de captación hasta su posterior descarga en el río Maipo. En la Figura 3-1 se muestra la ubicación del proyecto y se detalla el área de estudio correspondiente al Túnel El Volcán dentro del cuadro blanco.

Figura 3-1. Proyecto Alto Maipo y área de estudio sector Túnel El Volcán.

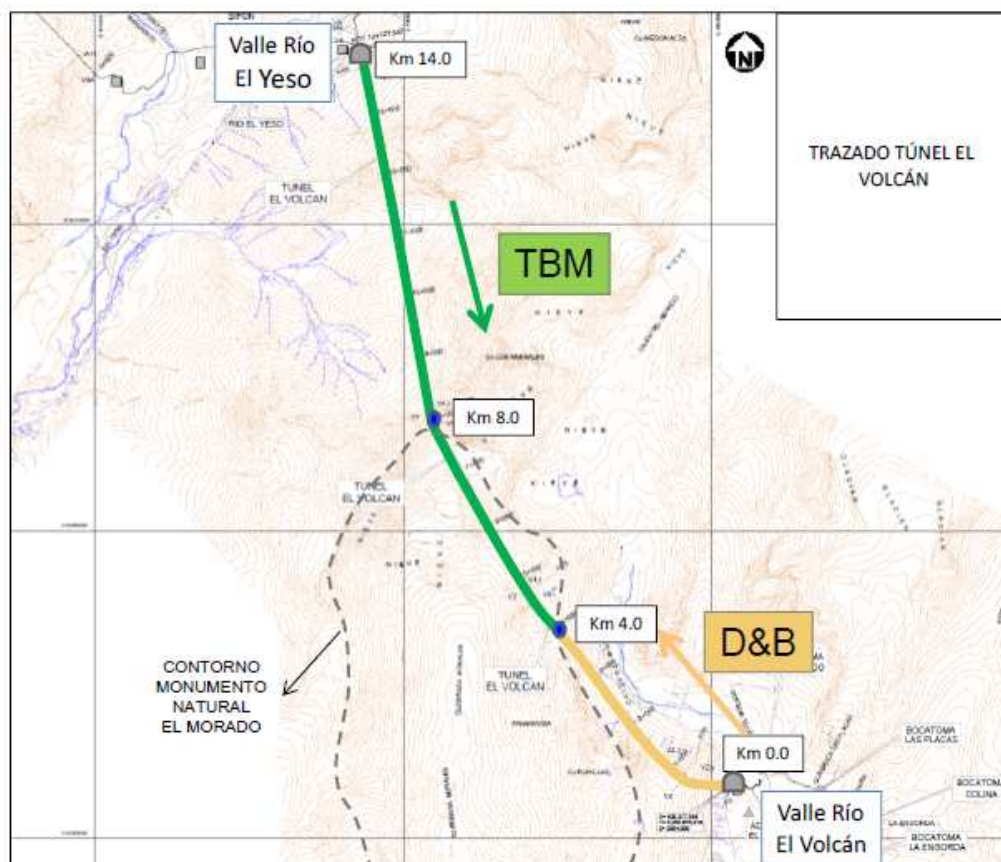


Fuente: Elaboración propia.

El Túnel El Volcán constituye el primer tramo del sistema de colección y transporte de agua hacia la futura central hidroeléctrica Alfalfal II, uniendo los valles del río El Volcán (km 0) y río El Yeso (km 14). Su construcción se desarrolla en dos frentes de trabajo. El primer frente se desarrolla mediante D&B desde el Portal V1 (Coordenadas Datum WGS 84 Huso 19S: 405.128,49 E; 6.260.518,39 N) en el valle del río El Volcán; mientras que el segundo frente se desarrolla mediante TBM desde el Portal V6 en el valle del río El Yeso. Aproximadamente, entre el km 4.0 al km 8.0, el túnel El Volcán pasará bajo al Monumento Natural El Morado, y la excavación del túnel en este tramo se realizará mediante TBM. Los frentes de avance, su respectivo método de excavación y el MN El Morado se muestran a modo de esquema en la Figura 3-2.



**Figura 3-2. Ubicación Monumento Natural El Morado y frentes de avance de excavación del Túnel El Volcán.**

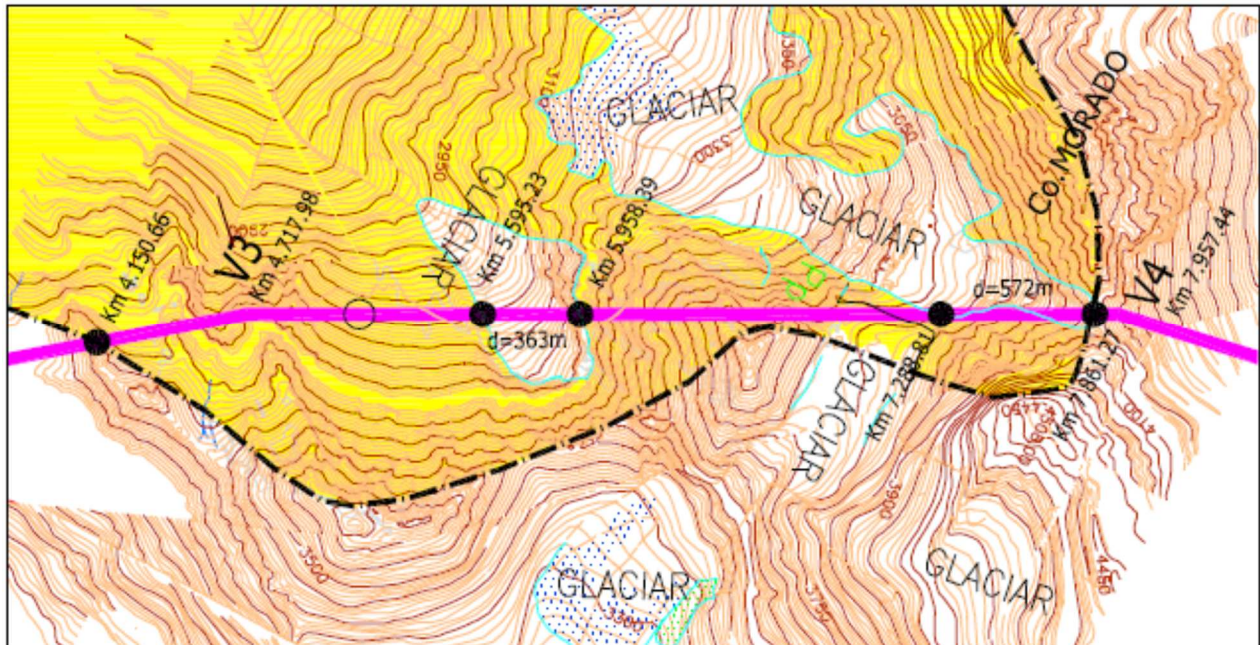


Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a CONAF [2], el M.N. El Morado contempla una superficie de 3.009 ha, y está constituido por un valle limitado en tres lados por cerros con alturas de hasta 5.000 m.s.n.m. El principal cauce de agua existente corresponde al estero Morales, un torrente que nace en las estribaciones de los cerros El Morado (5.060 m.s.n.m.) y San Francisco (4.345 m.s.n.m.), producto de los deshielos de los glaciares y nieves. El MN El Morado cuenta con dos glaciares principales, el Glaciar San Francisco y Glaciar Mirador El Morado, los que debido a su comportamiento de retroceso y deshielo glaciar, forman la Laguna El Morado a 2.400 m.s.n.m.

En la Figura 3-3 se muestra con mayor detalle, la intersección del trazado del Túnel El Volcán del PHAM y el límite del Monumento Natural El Morado. Cabe señalar que esta información se ha obtenido de los antecedentes contenidos en la evaluación ambiental del PHAM<sup>1</sup>.

**Figura 3-3. Detalle espacial de la intersección trazado del Túnel El Volcán y el límite del Monumento Natural El Morado, información contenida en la evaluación ambiental del PHAM.**



Fuente: Elaboración propia.

Considerando lo anterior, en la siguiente tabla se entregan las coordenadas aproximadas de los vértices del trazado del túnel El Volcán en el sector que se desarrollará mediante tronaduras (D&B), correspondientes al tramo desde el Portal V1 (Km 0,0) al punto de intersección del trazado y el límite del MN El Morado (Km 4.150,66).

<sup>1</sup> Plano AM-PL-TE-0018\_REV\_0 del Apéndice 1, Anexo 3 del Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo. Similar información contenida en el Plano Anexo 8 de la Adenda 1 del proceso de evaluación ambiental del PHAM.



**Tabla 3-1. Coordenadas aproximadas del sector donde el túnel El Volcán se desarrollará mediante tronaduras.**

Vértices	Coordenadas (Datum WGS84, Huso 19S)	
	Este	Norte
V1	405.128,49	6.260.518,39
V2	404.311,82	6.260.562,01
V3	402.214,25	6.263.146,74

Fuente: Elaboración propia.

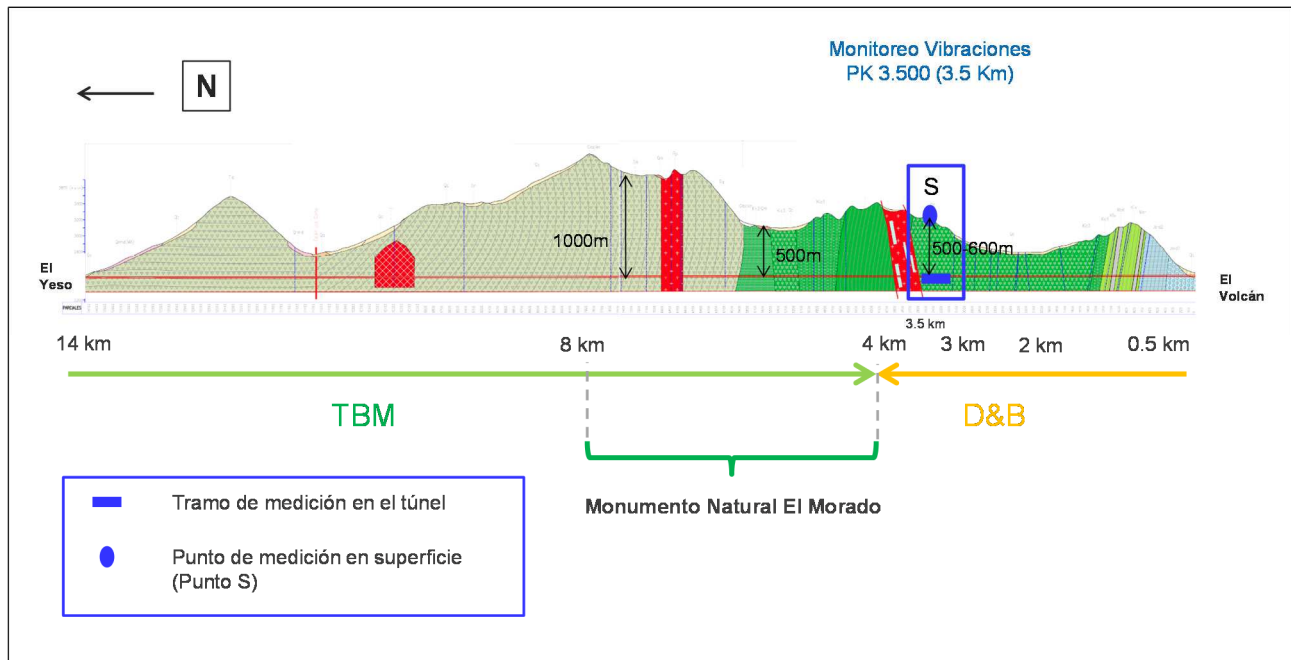
## 4 PROPUESTA METODOLÓGICA

### 4.1 Monitoreo de vibraciones

#### 4.1.1 Lugar

La propuesta considera la realización del monitoreo de vibraciones superficiales y dentro del túnel en un tramo del Túnel El Volcán cercano a la sección bajo el MN El Morado, específicamente a partir del PK 3.500 (3,5 km) y por un período de un mes, o el correspondiente a un avance aproximado de 200 m para el registro de al menos 12 tronaduras (Figura 4-1).

Figura 4-1. Tramo PK 3.500 (5,5 Km) para monitoreo de tronaduras Túnel El Volcán.



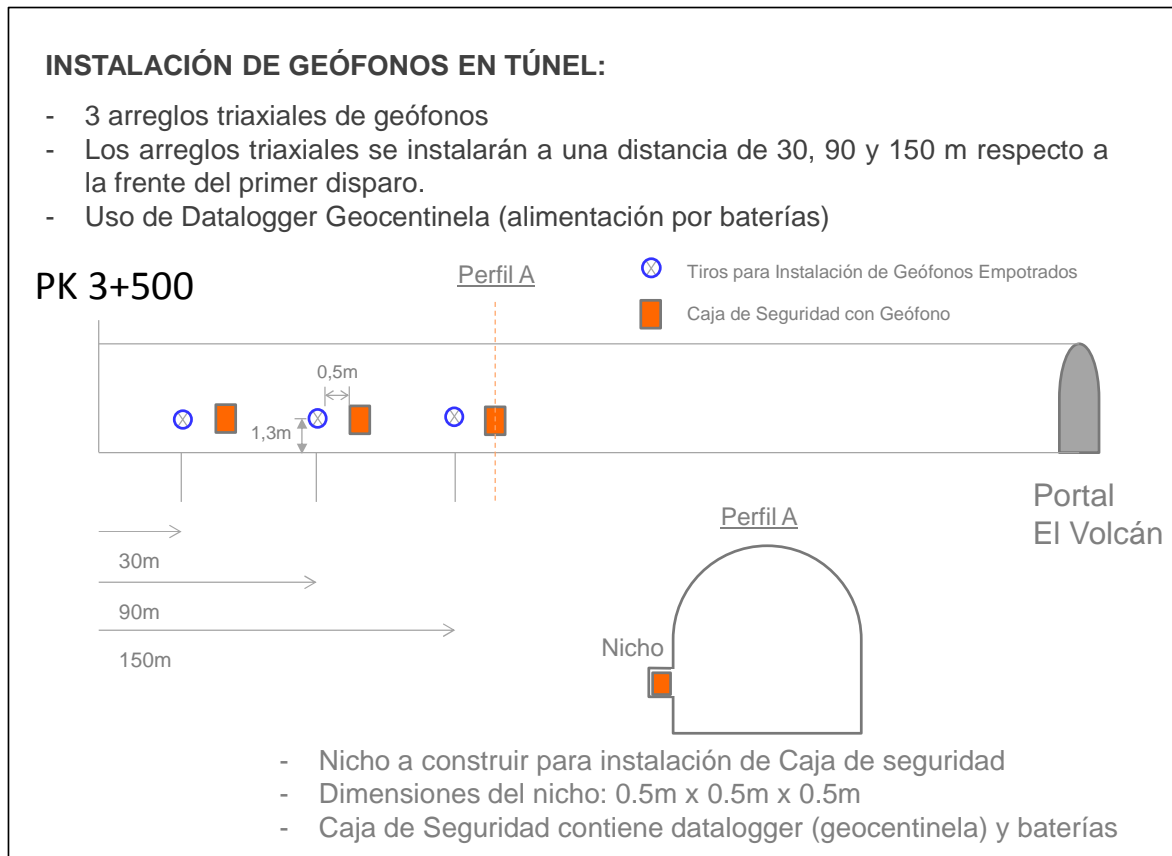
Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.2 Procedimiento y análisis

Para la ejecución del programa de monitoreo en el tramo en el entorno del PK 3.500 se instalará instrumental de medición de vibraciones tanto en superficie como dentro del túnel. Estos sistemas, tanto en el interior del túnel como en superficie estarán conectados a datalogger autónomos para la recolección de datos (Geocentinela). Los instrumentos instalados en superficie buscarán detectar las ondas sísmicas de las tronaduras, o si la amplitud de las ondas es demasiado baja, dejar establecida que esas ondas son indetectables por medio de instrumentación especializada.

Al interior del túnel, se instalarán tres arreglos triaxiales de geófonos cementados en la pared de roca, ubicados a distintas distancias con respecto a la frente de la primera tronadura. Los arreglos se instalarán a una distancia aproximada de 30 m, 90 m y 150 m de la frente (Figura 4-2), con el objeto de obtener la curva de atenuación de la amplitud de las vibraciones con la distancia. En función de las condiciones locales, se podrán conectar los Geocentinela a la energía eléctrica local, o utilizar baterías.

Figura 4-2. Instalación de geófonos al interior de túnel.



Fuente: Elaboración propia.

En la superficie del terreno se instalará un arreglo triaxial de geófonos anclado a un afloramiento rocoso, el cual se ubicará a una distancia entre 500 y 600 m al PK 3.500 del túnel. Este arreglo de superficie también contará con un Geocentinela para la recolección de datos, el cual estará alimentado por panel solar.

Como se indicó, el monitoreo de tronaduras se realizará por un período de un mes, requiriéndose un mínimo de 12 tronaduras a registrar. El retiro de datos se realizará con frecuencia semanal, tanto desde los Geocentinela de interior túnel como en superficie.

Con el procesamiento de la información de monitoreo dentro del túnel se podrá construir y calibrar un modelo de atenuación a escala intermedia-lejana, el cual se validará con la información del monitoreo realizado en la superficie del terreno. De esta forma, se obtendrá el modelo de campo lejano para predecir los niveles de

vibraciones de las ondas que se propagan dentro del macizo rocoso, y así estimar el nivel de vibraciones en superficie suponiendo un medio de transmisión de ondas homogéneo e isotrópico.

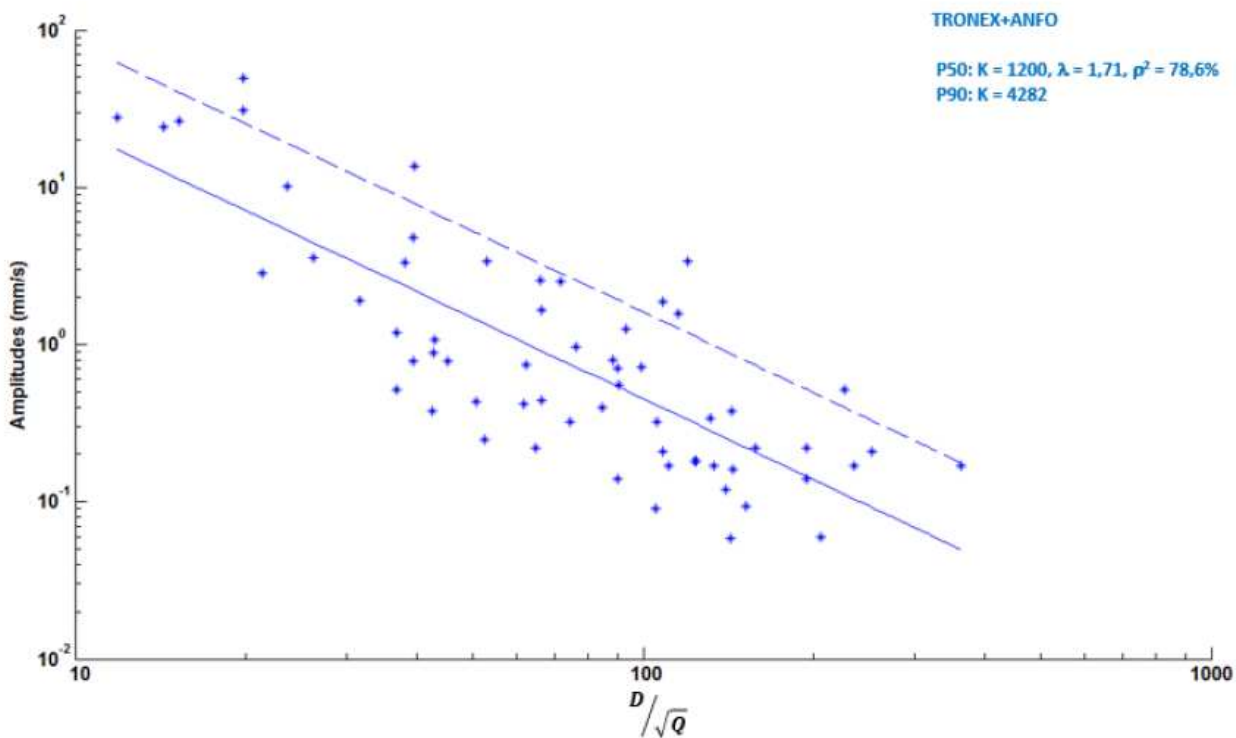
El modelo de campo lejano se determinará mediante el modelo de Devine, el cual estima la velocidad peak de partícula (PPV, por sus siglas en inglés) a una distancia de la fuente de tronadura dada una carga de explosivo detonada en forma simultánea. El PPV es un indicador de la cantidad de movimiento a la que una partícula es sometida por vibraciones y se puede estimar en base a la siguiente expresión:

$$PPV = K \left( \frac{\sqrt{Q}}{D} \right)^{\lambda} \text{ (mm/s)}$$

Donde Q es la carga de explosivos simultánea (kg), D la distancia a la fuente de tronadura (m), y  $K$  y  $\lambda$  son parámetros a determinar que dependen del medio y condición de la tronadura.

Con el modelo de campo lejano ya calibrado y a partir de la información de monitoreo, se puede entonces determinar la confiabilidad del modelo, obteniéndose resultados como el presentado en la Figura 4-3.

Figura 4-3. Ejemplo de Modelo de Devine y curvas de confiabilidad.



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.3 Fecha estimada de ejecución de las actividades de terreno

Dado el avance actual de las excavaciones desde el frente de D&B, se estima que las campañas de monitoreo de vibraciones por tronaduras en torno al PK 3.500 se realizarán entre marzo y mayo de 2018.



#### **4.1.4 Normativa aplicable**

De conformidad con lo dispuesto en los antecedentes de evaluación ambiental del PHAM<sup>2</sup>, los niveles de vibraciones por tronaduras se contrastarán con los máximos permitidos por la norma de referencia “Title 30: Mineral Resources; Part 816—Permanent Program Performance Standards—Surface Mining Activities; § 816.67 Use of explosives: Control of adverse effects”. Para regular la vibración de terreno máxima aceptable, esta norma establece los valores de velocidad de partículas máxima permitida (peek) para distintas distancias, además de una fórmula para determinar los máximos de carga considerando la distancia a los receptores cercanos.

En la siguiente tabla se entregan los valores límite de velocidad de partículas máxima permitida según la norma de referencia, expresados en pulgadas por segundo, para distintas distancias expresadas en pies.

**Tabla 4-1. Límites máximos de vibración del terreno permitidos según norma de referencia.**

<b>Distancia (D) del sitio de la explosión (pies)</b>	<b>Velocidad de partícula máxima permitida (V máx.) (pulgadas/segundos)</b>
0 a 300	1,25
301 a 5.000	1,00
5.0001 en adelante	0,75

Fuente: Elaboración propia.

#### **4.1.5 Medidas en caso de superación de la norma**

Si bien no se anticipan superaciones de la norma de referencia, en el caso de superación en un punto representativo de ubicación de las estructuras glaciares presentes en el MN El Morado y Sitio Prioritario El Morado, como primera medida se realizará la paralización inmediata de las tronaduras para posteriormente evaluar alternativas de continuación, entre las que se considerarán opciones de redistribución de cargas u otras.

---

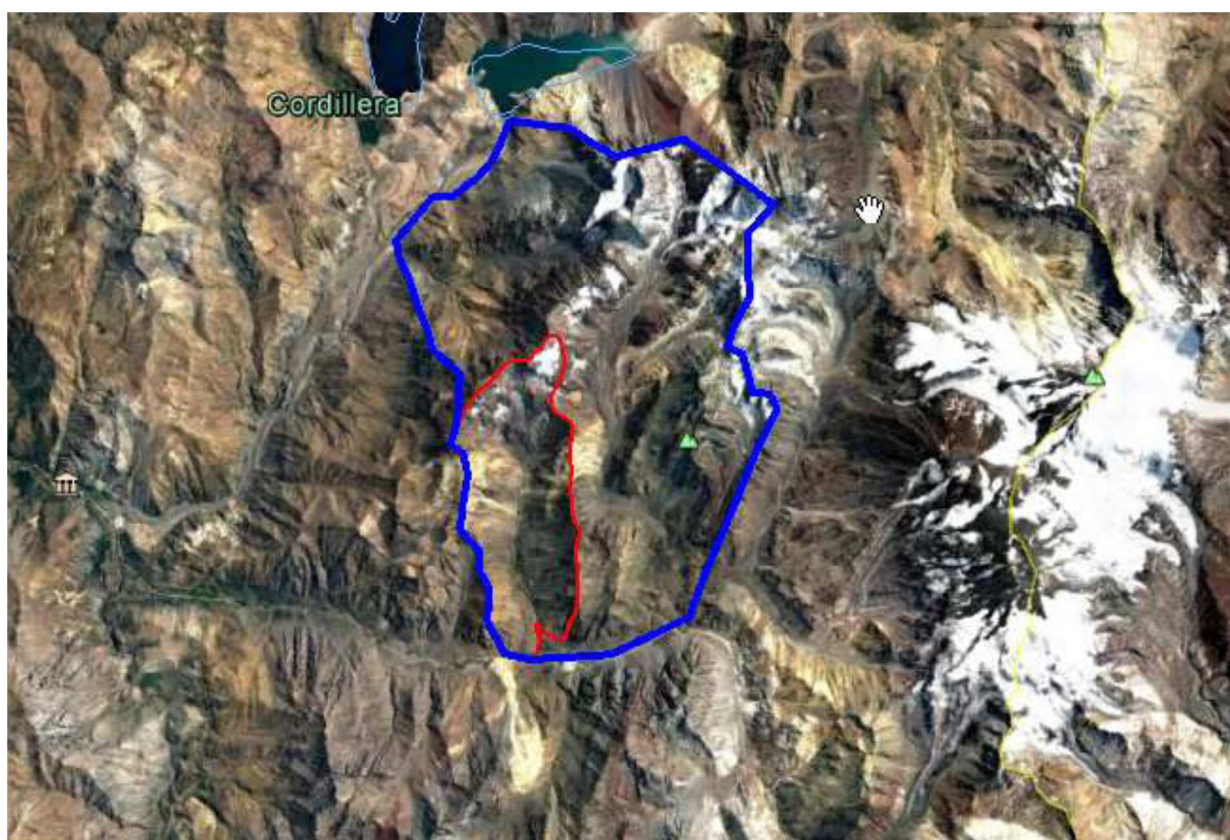
<sup>2</sup> Informe Consolidado de Evaluación, Capítulo IX Plan de seguimiento de las variables ambientales, Sección 1.2 Programa de Monitoreo de Ruido y Vibraciones en la Etapa de Construcción, Parámetros de Cumplimiento: “Para evaluar el ruido producido por las tronaduras se contrastarán los niveles de ruido en situación con Proyecto con los máximos permitidos por la norma de referencia (“Title 30: Mineral Resources; Part 816—Permanent Program Performance Standards—Surface Mining Activities; § 816.67 Use of explosives: Control of adverse effects”).”.

## 4.2 Determinación de variación de volumen y superficie de glaciares

### 4.2.1 Área de estudio

Para el análisis de variación del volumen y de superficie de Glaciares, se propone un área de estudio de aproximadamente 15.000 ha que incluye a todas las estructuras de glaciares pertenecientes al MN El Morado y aquellas del Sitio Prioritario El Morado que comparten divisoria de cuenca con el Monumento Natural (Figura 4-4).

**Figura 4-4. Área de estudio de glaciares.**



Fuente: Elaboración propia.

#### **4.2.2 Procedimiento y análisis**

Para determinación de la variación de volumen y superficie de glaciares se realizarán vuelos LIDAR (Light Detection And Ranging), escala 1:5.000, sobre el área de estudio entre el 6 de marzo y el 7 de abril de los años 2017 y 2018, y eventualmente (si correspondiera) el año 2019.

El sistema LIDAR realiza un levantamiento topográfico del terreno en estudio, colectando datos de posición (x, y) y de elevación elipsoidal (z) en intervalos predefinidos, proporcionando datos de primero, segundo, tercer y cuarto retorno; los cuales permiten determinar las alturas del terreno y elementos en superficie.

La variación de volumen y de superficie de glaciares se realizará mediante la comparación de los productos 2D y 3D obtenidos de las estructuras glaciares en los vuelos LIDAR de años consecutivos.

#### **4.3 Análisis histórico de la evolución de la superficie de Glaciares**

El área de estudio propuesto para el análisis histórico de la evolución de la superficie de los glaciares corresponde a la misma indicada en el punto 4.2.1 del presente documento, la que cubre una superficie de aproximadamente 15.000 ha e incorpora todos los glaciares presentes en el MN El Morado y aquellos del Sitio Prioritario El Morado que comparten divisoria de cuenca con el Monumento Natural.

La variación de la superficie de los glaciares se realizará mediante la comparación de información cartográfica histórica (fotografías aéreas e imágenes satelitales de alta resolución) del área de estudio obtenidas entre los años 1955 y 2016 (Tabla 4-2).

**Tabla 4-2. Tipo de imagen y fuente empleada para el análisis histórico de la superficie de los glaciares en el área de estudio.**

<b>Año</b>	<b>Tipo</b>	<b>Fuente</b>
1955	Fotografía aérea	IGM
1996	Fotografía aérea	SAF
2010	Imagen satelital	Worldview-2
2013	Imagen satelital	Google Earth
2015	Imagen satelital	Geoeye-1
2016	Imagen satelital	Worldview-2

Fuente: Elaboración propia.

Los glaciares serán fotointerpretados de manera manual en los diferentes períodos de análisis sobre la base de criterios geomorfológicos, utilizanso software ArcGis 10.3.

La propuesta también considera el estudio de la variación en superficie de los glaciares presentes en relación a información climática del mismo período de análisis (años 1995 a 2016), con la finalidad de evaluar posibles correlaciones entre la alteración de la superficie de los glaciares y variables climáticas relevantes (temperatura, precipitación, etc.).

## **5 INFORMES**

El presente Programa de monitoreo de vibraciones por tronaduras en el túnel El Volcán, en su Etapa II, considera la generación de informes semestrales (cada seis meses) para informar el avance de las actividades propuestas, a partir de la fecha de aprobación del programa por parte de la Dirección General de Aguas, Región Metropolitana.

## **6 REFERENCIAS**

- [1] Resolución Exenta N° 256/09. República de Chile, Comisión Regional del Medio Ambiente de la Región Metropolitana de Santiago, Santiago, 30 de Marzo de 2009.
- [2] Documento de Trabajo N°256 Plan de Manejo Monumento Natural El Morado. Ministerio de Agricultura, Corporación Nacional Forestal Región Metropolitana, Abril 1997.