

# **SERVICIO DE MONITOREO DE VIBRACIONES POR TRONADURA Y CONTRUCCIÓN DE MODELO DE ATENUACIÓN TEMPRANA TÚNEL EL VOLCÁN**

## **PROPUESTA TÉCNICO-ECONÓMICA**

## 1.0 INTRODUCCIÓN

Alto Maipo SpA se encuentra en fase de desarrollo de su proyecto Alto Maipo, el cual consiste en la construcción de dos centrales hidroeléctricas de paso y su respectiva red de túneles de transporte de agua. En este contexto, Alto Maipo requiere validar la hipótesis del nulo o imperceptible efecto que tendrán las vibraciones generadas por las tronaduras de construcción de uno de sus túneles, Túnel El Volcán, en el tramo donde se construirá mediante tronadura convencional (el resto del trazado será mediante tunelera, TBM). En respuesta a lo anterior, y de acuerdo a lo solicitado por Alto Maipo SpA (AM), E-Mining Technology S.A. (EMT) detalla en el presente documento la propuesta técnico-económica referida al “Servicio de Monitoreo de Vibraciones por Tronadura y Construcción de Modelo de Atenuación Temprana en Túnel El Volcán”.

## 2.0 OBJETIVOS Y ALCANCES

El objetivo del servicio es la elaboración de un modelo de atenuación de vibraciones, asociado al monitoreo de las tronaduras de avance de la construcción del Túnel El Volcán, con el fin de evaluar tempranamente, dentro del desarrollo del proyecto, el nivel de vibraciones que pudieran alcanzar la superficie.

El alcance del servicio considera el monitoreo de tronaduras de dos tramos del Túnel El Volcán, ubicados dentro de los 2 primeros kilómetros de construcción del túnel desde el sector de El Volcán (Km 0.5 y Km 2.0). Cada tramo considera el monitoreo de tronaduras por un período de un mes. Se contempla la entrega, por parte del cliente, de toda la información técnica pertinente para la correcta ejecución del proyecto (información geológica-geotécnica disponible del avance de la construcción del túnel, malla de perforación teórica, carguío teórico, secuencia de iniciación, entre otros). La planificación de las actividades y, por ende, el horizonte de los servicios está ligado al programa de la construcción del túnel. La perforación en roca por método Drill&Blast (D&B) desde el valle El Volcán, está considerada su inicio en el km 0.2, con fecha estimada para fines de Noviembre 2015. Por lo anterior, y de acuerdo a los ritmos de avance del túnel, se estima que la realización de los trabajos de terreno se llevará a cabo en los meses de Febrero (km 0.5) y Octubre 2016 (km 2.0).

Este servicio, considera la entrega de los análisis y resultados en un documento con una estructura y formato, que permita ser presentado a la autoridad, en caso de ser requerido.

### 3.0 ANTECEDENTES GENERALES

El Proyecto Alto Maipo se ubica en el sector del Cajón del Maipo, Región Metropolitana, y consiste en la construcción de 2 centrales hidroeléctricas de paso y su respectiva red de túneles de transporte de agua. En Figura 1, se presenta la ubicación del proyecto, destacándose el área de estudio correspondiente al Túnel El Volcán, el cual corresponde al primer tramo del sistema de colección y transporte de agua hacia las futuras centrales y que conecta el Valle del Río El Volcán, a la altura de La Engorda, con el Valle del Río El Yeso aguas abajo del embalse El Yeso.

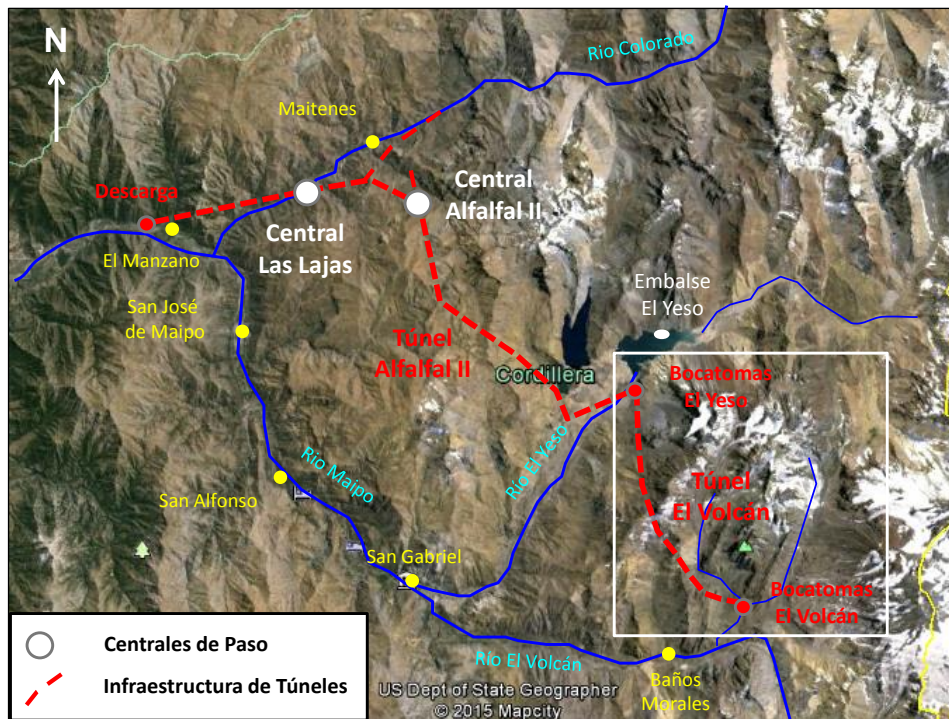


FIGURA 1. PROYECTO ALTO MAIPO (EN RECUADRO EL ÁREA DE ESTUDIO)

El Túnel El Volcán posee 14 km de extensión y se tiene contemplado construir desde dos frentes de avance (Figura 2): la primera desde el sector El Volcán (km 0), mediante tronadura convencional (Drill&Blasting), y la segunda desde el sector El Yeso (km 14), mediante tunelera (Tunnel Boring Machine, TBM). El trazado del túnel atraviesa, entre el kilómetro 4.0 y 8.0, bajo el área del Monumento Natural El Morado, sector donde se tiene contemplado la construcción del túnel mediante TBM. La perforación en roca por método Drill&Blast (D&B) desde el valle El Volcán, está considerada su inicio en el km 0.2, con fecha estimada para fines de Noviembre 2015.

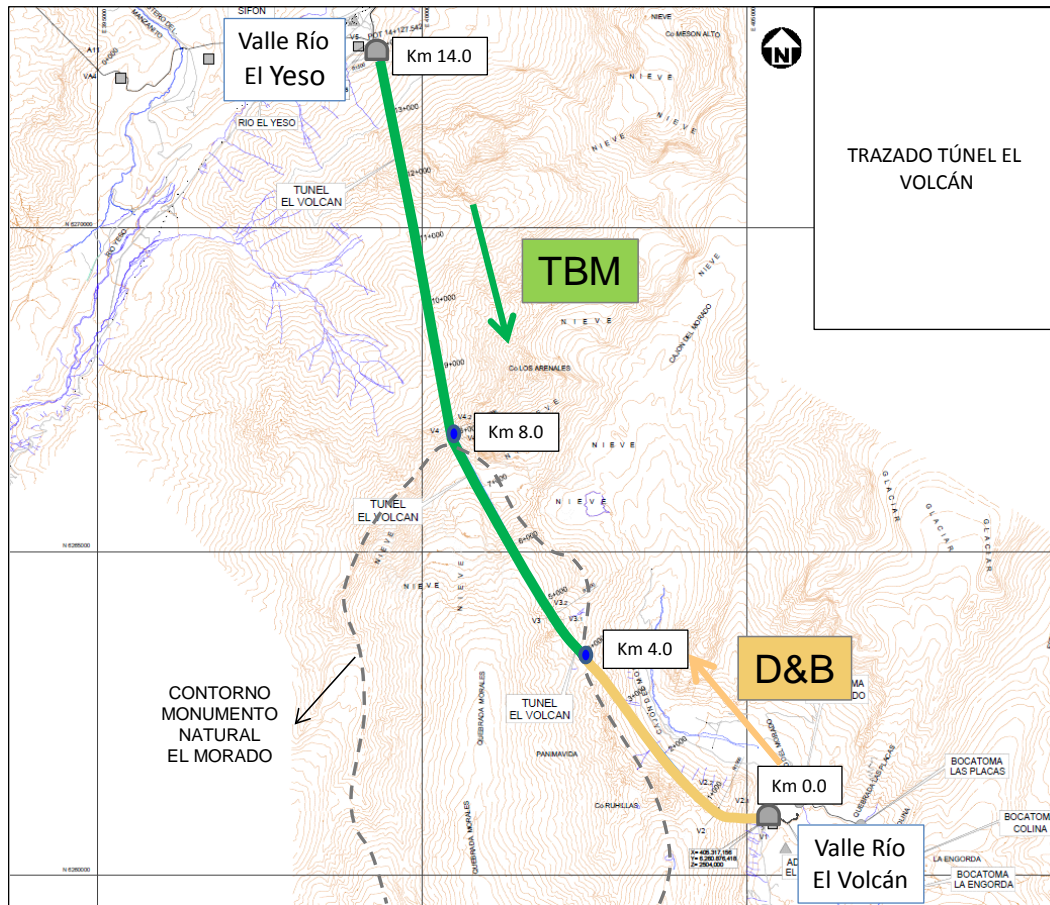


FIGURA 2. PLANO TRAZADO TÚNEL EL VOLCÁN

Como antecedente general, se tiene que el trayecto del Túnel El Volcán atraviesa 4 unidades geológicas principales (Formaciones): desde Este a Oeste tenemos la Formación Río Damas, Formación Lo Valdés, Formación Colimapu y Formación Abanico (Figura 3).



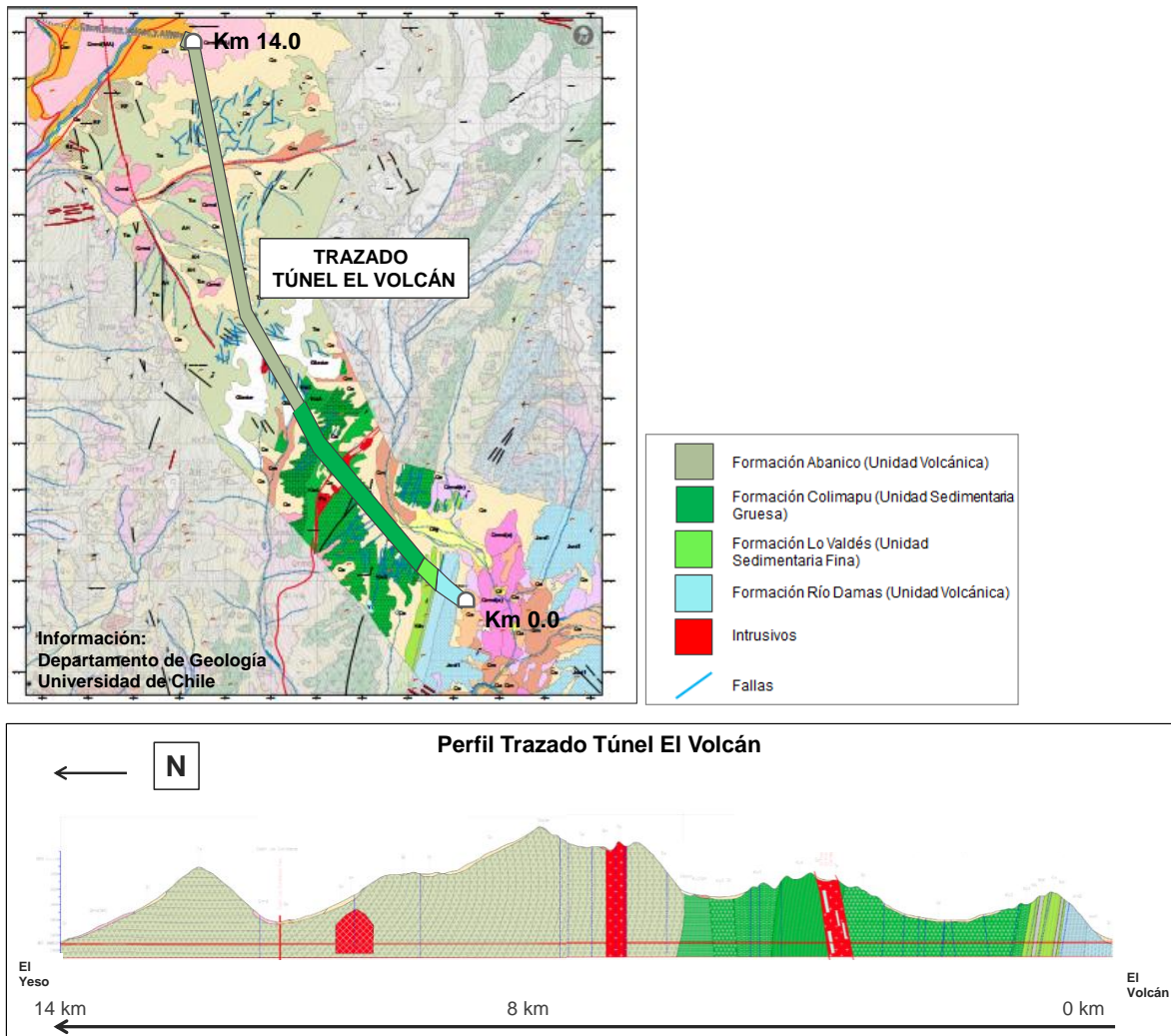


FIGURA 3. GEOLOGÍA TRAZADO TÚNEL EL VOLCÁN

#### 4.0 METODOLOGÍA DE TRABAJO

La metodología de trabajo a adoptar para la ejecución de este servicio, considera desarrollar de manera integrada y eficiente las actividades de captura de datos de monitoreo de vibraciones, tanto en túnel como en superficie, con el uso de instrumental especializado para estos fines y manipulado por personal capacitado. Los trabajos de terreno consideran la implementación de los procedimientos y estándares de control de riesgos propios de EMT, además de aquellos indicados por el cliente.

El procesamiento y análisis de la información registrada por los sensores, será llevada a cabo por un asesor experto en tronadura, mediante el uso de criterios, herramientas y modelos utilizados ampliamente en el desarrollo de este tipo de estudios, con un enfoque importante en la validación de los resultados. Una vez procesada y analizada la información, se procederá a la generación de los modelos de atenuación de vibraciones de los tramos monitoreados. Finalmente, se elaborará un documento al término del proyecto, el cual considerará los elementos y estructuras necesarias que le permitan ser presentado ante la autoridad respectiva.

## 5.0 DESCRIPCIÓN DEL SERVICIO

El servicio considera el monitoreo de las vibraciones de tronaduras asociadas a la construcción del Túnel El Volcán, permitiendo evaluar su propagación a través del macizo rocoso y validar la hipótesis del nulo o imperceptible impacto esperado en superficie respecto a la ejecución de las tronaduras, debido a la distancia existente entre las labores y la superficie.

Este estudio se enfocará a analizar el efecto de las vibraciones por tronadura en el trayecto inicial del túnel en sus primeros 2 kilómetros. El monitoreo se realizará en dos tramos, ubicados en las proximidades del km 0.5 y km 2.0 del trazado del túnel. Para este fin, se instalará instrumental de medición de vibraciones, tanto en el túnel como en superficie.

Los tramos a monitorear consideran el registro de las vibraciones por tronaduras durante el período de 1 mes, estimándose el registro de al menos 12 tronaduras en cada tramo.

Conceptualmente, las tronaduras utilizadas en labores mineras, generan un volumen de gases a alta temperatura y presión, que al expandirse realiza un trabajo mecánico de fragmentación de las rocas. Una parte del total de la energía liberada se consume en el trabajo útil de fragmentación y desplazamiento de rocas. El resto se disipa en otras formas de energía: térmica, luminosa, sónica, vibratoria, etc. Entre el 5 y el 10 % de la energía producida se transmite a través de las rocas en forma de ondas sísmicas generando vibraciones que se atenúan mientras se alejan del punto de explosión. Actualmente, se considera a la Velocidad Peak de Partícula (PPV), como un indicador de la cantidad de movimiento a la que una partícula es sometida por vibraciones. La medición de esta velocidad es realizada a través de geófonos.

Para realizar la medición de vibraciones al interior del túnel se instalarán en la pared de roca 3 arreglos triaxiales de geófonos empotrados en roca (cementados), mientras que en superficie se instalará un arreglo triaxial de geófono. Estos sistemas, tanto en el interior del túnel como en superficie estarán conectados a datalogger autónomos para la recolección de datos (Geocentinela).

En el interior del túnel, la instrumentación se instalará a distintas distancias en torno a la primera

tronadura. Se propone como distancia inicial a la frente de la primera tronadura a registrar: 30 m, 90 m y 150 m.

El objetivo de esta medición, es obtener la curva de atenuación de la amplitud de las vibraciones con la distancia, de modo de inferir el nivel de vibraciones en superficie, suponiendo un medio de transmisión de las ondas homogéneo e isotrópico. Lo anterior, permitirá construir y calibrar un modelo de campo lejano para predecir los niveles de vibraciones de las ondas que se propagan dentro del macizo rocoso. Por lo anterior, las ondas de interés corresponden a las ondas que viajan dentro del macizo rocoso, es decir las volumétricas P y S (Figura 4).

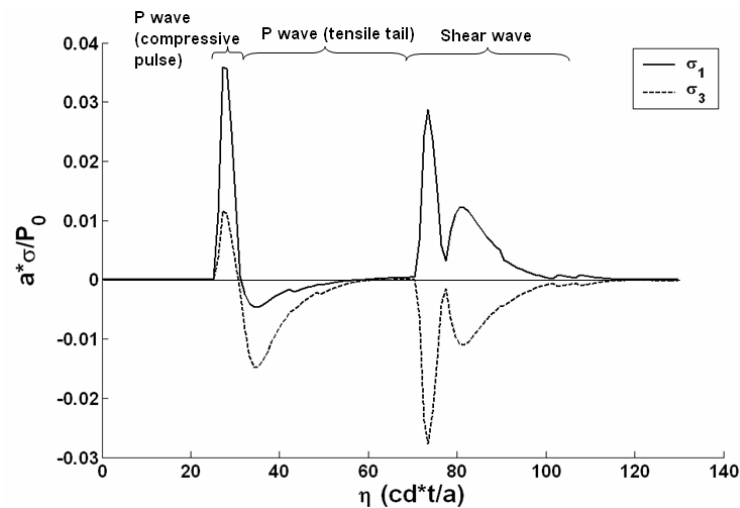


FIGURA 4. SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LAS ONDAS VOLUMÉTRICAS GENERADAS POR LA TRONADURA: ONDA P (PULSO DE COMPRESIÓN Y COLA DE TRACCIÓN) Y ONDA S.

Se puede entonces proponer un modelo de PPV (Modelo de Devine) para ondas volumétricas de tipo:

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

Con D la distancia en metros a la fuente de las ondas, Q la carga de explosivo empleada, y K y  $\lambda$  parámetros de ajuste.

Finalmente, empleando el modelo de antes descrito, se calcula la probabilidad de ocurrencia a partir de la información del monitoreo, del cual se obtienen resultados como el presentado en Figura 5, lo que finalmente permite estimar el nivel de PPV a una cierta distancia desde la fuente.

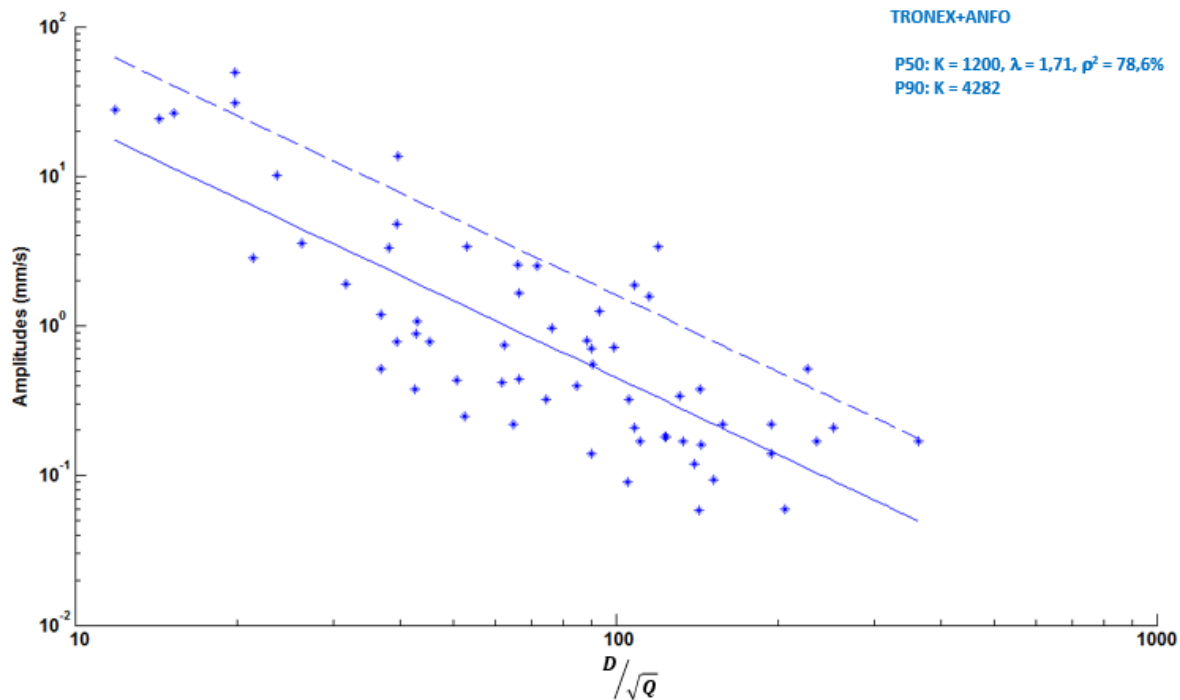


FIGURA 5. EJEMPLO DE MODELO DE DEVINE Y PROBABILIDADES DE OCURRENCIA

Para evitar la contaminación de los registros con las sondas sónicas, se propone la instalación de los geófonos dentro de perforaciones en roca, tal que el sensor se encuentre a una distancia no menor a 2 m de la pared del túnel, minimizando la interferencia con las ondas superficiales.

Los tramos considerados para la realización del monitoreo de vibraciones, fueron escogidos buscando, en primer lugar, obtener un modelo temprano de atenuación de vibraciones en los primeros kilómetros de construcción del Túnel El Volcán y, en segundo lugar, validar las mediciones de vibraciones en el sector de mayor cercanía a superficie.

Como fue mencionado anteriormente, este monitoreo contempla la instalación de instrumental de medición en el túnel y superficie. Los geófonos 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.

La ubicación de los tramos seleccionados se presenta en Figura 6. El detalle de estos tramos se presenta a continuación:

- Tramo 1 (km 0.5): El objetivo del monitoreo de este tramo es la construcción temprana de un modelo de atenuación de vibraciones. La distancia a superficie estimada será de 400 m, lugar



donde se instalará instrumental de medición (Punto A en Figura 6). La fecha de realización de este monitoreo se estima para el mes de Febrero 2016.

- Tramo 2 (km 2.0): El objetivo del monitoreo de este tramo, es registrar las vibraciones por tronadura en el sector con la menor distancia a superficie del trazado del túnel El Volcán (200 m), lugar donde se instalará instrumental de medición (Punto B en Figura 6). La fecha de realización de este monitoreo se estima para el mes de Octubre de 2016.

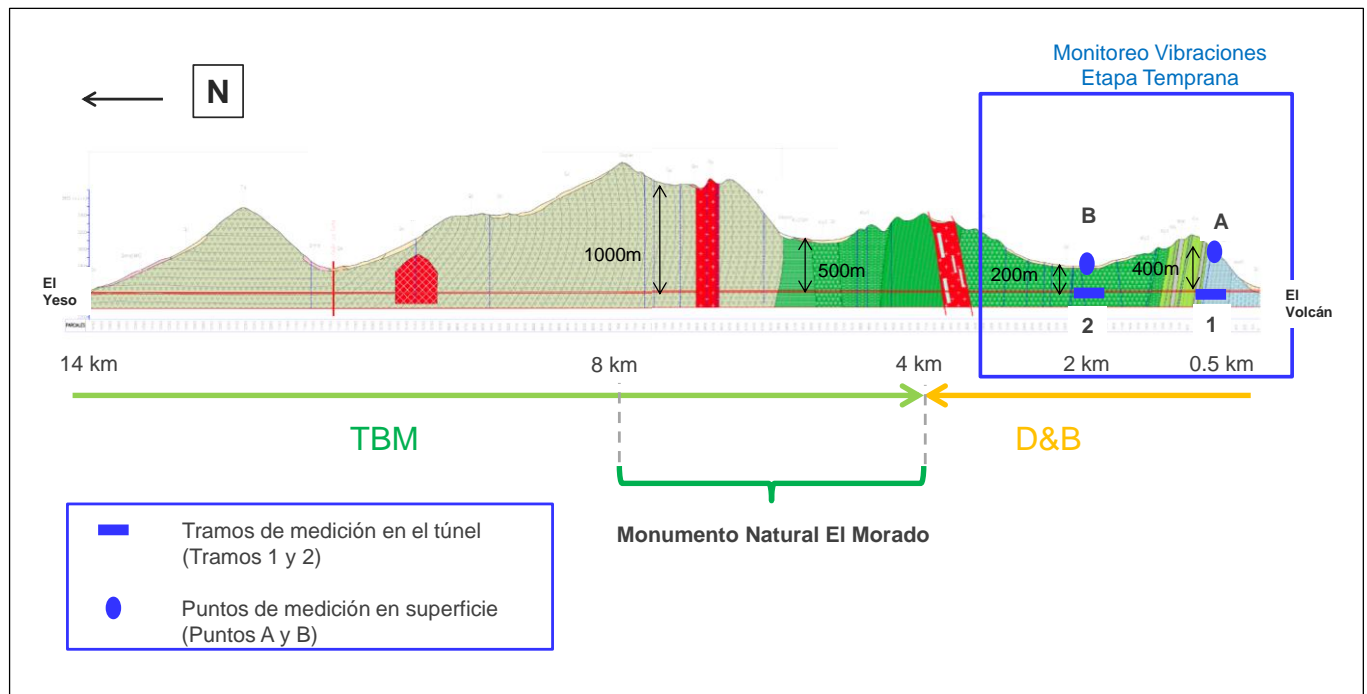


FIGURA 6. TRAMOS ESCOGIDOS PARA MONITOREO DE TRONADURAS TÚNEL EL VOLCÁN

Para ambos tramos, se contempla la ejecución de las siguientes actividades técnicas:

- Instalación en el túnel de 3 arreglos triaxiales cementados (instalados en una perforación subhorizontal a una distancia de 2 m desde la pared) a distancias de 30 m, 90 m y 150 m de distancia desde la frente asociada a la primera tronadura a monitorear. Cada arreglo tendrá asociado un datalogger tipo Geocentinel para la captura de la información. En función de las condiciones locales, se podrán conectar los Geocentinel a la energía eléctrica local, o utilizar baterías. Los arreglos de geófonos solamente servirán para monitorear el tramo donde serán cementados.
- Instalación de 1 arreglo triaxial en superficie lo más cercano posible sobre la traza del túnel. Este arreglo se instalará aperrando el equipo a un afloramiento rocoso horizontal, lo más cercano posible sobre la traza del túnel y coincidente con cada uno de los

tramos a monitorear en el túnel. Este arreglo de superficie también contará con un Geocentinela para la captura de las vibraciones, el cual estará alimentado por panel solar. El mismo geófono podrá ser reutilizado para los dos puntos de superficie (Punto A y Punto B).

- Monitoreo de tronaduras por un período de 1 mes, estimándose un mínimo de 12 tronaduras a registrar.
- Uso de Geocentinela para el registro de la información proveniente de los sensores (geófonos), tanto en aquellos instalados en el túnel como en superficie.
- Se considera una captura semanal de los datos, para lo cual el equipo de EMT se trasladará a terreno a descargar la información desde los Geocentinela, tanto en el túnel como superficie.
- Procesamiento de la información y construcción de un modelo de atenuación geométrica a escala intermedia-lejana.
- Validación de la extrapolación del modelo de atenuación del interior túnel hasta la superficie.

Cabe mencionar que la ejecución de los trabajos de terreno a realizar, ya sea dentro del túnel como en superficie, requiere la permanente y eficiente coordinación entre EMT y Alto Maipo. Asimismo, EMT implementará, durante la ejecución de todos los trabajos en terreno, sus políticas, procedimientos y estándares técnicos y de control de riesgos, que garanticen el correcto y seguro desarrollo de sus tareas. Lo anterior sin perjuicio de adoptar los mecanismos de control de riesgos implementados por el Alto Maipo.

## 6.0 PRODUCTOS DEL SERVICIO

El servicio considera como entregables los siguientes productos:

- Reportes de actividades en terreno al término de cada etapa de monitoreo (Tramo 1 y Tramo 2).
- Nota Técnica Modelo de Atenuación de Monitoreo Tramo 1.
- Informe Final Extendido, con los resultados y conclusiones del monitoreo de los Tramos 1 y 2. Informe en formato y estructura para ser presentado a la autoridad, de ser requerido. Se entregarán los respaldos de todas las mediciones en los anexos respectivos.

**Nota:** Los antecedentes, registros e información, tanto proporcionados por el Cliente como emitidos por EMT durante el desarrollo de este trabajo, se consideran reservados y confidenciales.

## 7.0 EQUIPO DE TRABAJO

Para cumplir con los objetivos planteados, se definió un equipo compuesto por:

- Jefe de Proyecto, quién será el responsable de orientar y coordinar a los equipos de trabajo y a los recursos para hacer cumplir las metas y objetivos acorde con las directrices entregadas por el directorio y acordadas con el cliente.
- Mesa Técnica de Asesores, quienes darán las definiciones y directrices metodológicas, participando sistemática en todas las etapas del proyecto y manteniendo una relación estrecha con el cliente.
- Ingeniero de Control de proyectos, quien será el responsable de velar por los compromisos establecidos en reuniones con el cliente y llevar el control administrativo del proyecto.
- Especialistas Geotécnicos y Técnicos, quienes serán los responsables de llevar a cabo el proyecto.

La Figura 7, muestra el organigrama del equipo de trabajo para el servicio.

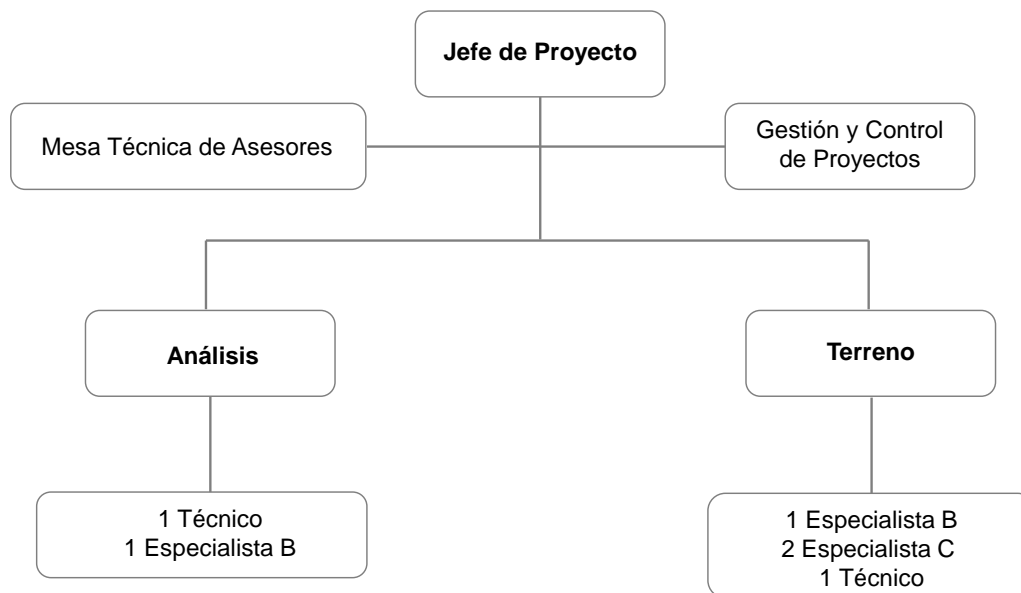


FIGURA 7. ORGANIGRAMA DEL SERVICIO

Cabe destacar que la dotación de profesionales indicada, tendrá una dedicación parcial al proyecto.

## 8.0 EQUIPOS E INSUMOS

Los equipos e insumos considerados para desarrollar el servicio son:

- Camioneta 4x4 con estándar minero y en cumplimiento de todos los requerimientos de Alto Maipo.
- Radio Portátil y Radio Base.
- Licencia Software Minesight.
- Instrumentación Monitoreo Vibraciones:
  - a. Geófonos Instantel (arreglos triaxiales).
  - b. Geocetnela.

## 9.0 APORTES DEL CLIENTE

Los aportes del cliente para la ejecución del servicio son:

- Perforación de los tiros para instalación de geófonos al interior del túnel (perforación tiros subhorizontales a una distancia no menor a 2 m desde la pared) y aporte de lechada para la cementación de los tiros.
- Dar facilidades para acceder al túnel y accesos superficiales del proyecto.
- Entrega de toda la información técnica pertinente y dentro de los tiempos requeridos para la correcta ejecución del proyecto: información geológica-geotécnica disponible del avance de la construcción del túnel, malla de perforación teórica, carguío teórico, secuencia de iniciación, entre otros.

## 10.0 PLAZOS DEL PROYECTO

El servicio propuesto contempla un plazo tentativo de 12 meses, con inicio el 01 de Enero de 2016 y término el 31 de Diciembre de 2016. En la Tabla 1, se presenta el calendario de actividades.

TABLA 1. CALENDARIO DE ACTIVIDADES DEL SERVICIO

ACTIVIDADES	CALENDARIO											
	ene-16	feb-16	mar-16	abr-16	may-16	jun-16	jul-16	ago-16	sep-16	oct-16	nov-16	dic-16
Administración del proyecto												
Reuniones de partida												
Visita de Reconocimiento												
Preparación y Coordinación de Terreno Monitoreo Tramo 1 - Punto A												
Trabajo de Terreno Monitoreo Tramo 1 - Punto A												
Procesamiento y análisis de Información Monitoreo Tramo 1 - Punto A												
Construcción Modelo de Atenuación Temprana Tramo 1 - Punto A												
Elaboración de Nota Técnica y Reunión de Presentación de Resultados												
Preparación y Coordinación de Terreno Monitoreo Tramo 2 - Punto B												
Trabajo de Terreno Monitoreo Tramo 2 - Punto B												
Procesamiento y análisis de Información Monitoreo Tramo 2 - Punto B												
Construcción Modelo de Atenuación Temprana Tramo 2 - Punto B												
Elaboración Informe Final												
Reunión de Presentación de Resultados Finales												

Dentro del servicio, se contempla la realización de presentaciones de resultados y reuniones técnicas con el cliente.

## 11.0 PRESUPUESTO DEL SERVICIO

El presupuesto neto total por las tareas a realizar dentro del servicio asciende a **UF** **Unidades de Fomento**). En la Tabla 2 se muestra el detalle de presupuesto.



TABLA 2. PRESUPUESTO SERVICIO MONITOREO VIBRACIONES Y GENERACIÓN DE MODELO ATENUACIÓN TEMPRANA TÚNEL EL VOLCÁN

SERVICIO DE MONITOREO DE VIBRACIONES Y CONSTRUCCIÓN DE MODELO DE ATENUACIÓN TEMPRANO		
N° ITEM	ACTIVIDADES	VALOR (UF)
1	Visita de reconocimiento (Tramo 1 y Punto A)	
2	Instalación de instrumentos (Tramo 1 y Punto A / Tramo 2 y Punto B)	
3	Recuperación de datos (Tramo 1 y Punto A / Tramo 2 y Punto B)	
4	Procesamiento información y reporte (Tramo 1 y Punto A)	
5	Procesamiento información (Tramo 2 y Punto B) e Informe final	
TOTAL		

Se considera la emisión de cuatro estados de pago bajo la siguiente modalidad:

- **Estado de Pago 1:** Término Campaña de Terreno Monitoreo Tramo 1, contra entrega de reporte de actividades de terreno (Marzo 2016).
- **Estado de Pago 2:** Entrega Nota Técnica Modelo de Atenuación Monitoreo Tramo 1 y Presentación de Resultados (Abril 2016).
- **Estado de Pago 3:** Término Campaña de Terreno Monitoreo Tramo 2, contra entrega de reporte de actividades de terreno (Noviembre 2016).
- **Estado de Pago 4:** Entrega Informe Final Extendido del Estudio y Presentación de Resultados (Diciembre 2016).

## 12.0 CONSIDERACIONES

- Esta propuesta tiene una validez de 30 días.
- El valor total del servicio es un valor neto y no considera el impuesto al valor agregado IVA.
- Utilidades y gastos generales se incluyen en las tarifas de los profesionales.
- Se considera un plazo máximo de 5 días para la revisión por parte del mandante de los Estados de Pago a entregar por EMT.
- El servicio se debe formalizar a través de un contrato u orden de compra.

- 
- Se considera que el mandante proporciona la información base en tiempo y forma por lo que cualquier retraso en el aporte de información por parte del mandante deberá de ser reevaluado en la planificación.
  - Aceptada la propuesta se hará un plan de implementación en detalle ajustado del servicio.