



UNIVERSIDAD
SAN SEBASTIAN
VOCACIÓN POR LA EXCELENCIA

Universidad San Sebastián

Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño

Ingeniería Civil de Minas

Sede Santiago-Bellavista

**“Estudio de algunas Tecnologías Inteligentes en los Procesos de
Perforación y Tronadura en la Minería del Cobre en Chile”**

Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil en Minas

Profesor Guía: Roberto Acevedo, PhD

Alumno: Sr. Gonzalo Lanas Soto

Santiago, Chile

2023

HOJA DE CALIFICACIÓN

Santiago, _____ de _____ del 2023

Los miembros de la comisión evaluadora, detallados al final de la presente página, dejan constancia de que el alumno _____ ha aprobado su Proyecto de Título para optar al título de Ingeniero Civil en Minas, con nota:

Profesor Guía

Dr. Roberto Acevedo

Profesor Evaluador

Dr. Andrés Soto-Bubert

Profesor Evaluador

Dr. Marco Antonio Alfaro Sironvalle

© Gonzalo David Lanas Soto.

Se autoriza la reproducción parcial o total de esta obra con fines académicos, por cualquier forma, medio o procedimiento, siempre y cuando se incluya la cita bibliográfica del documento.

Santiago, Chile

2023

A mis padres y hermana que a pesar de no poder verlos a diario por la distancia, siempre han estado apoyándome en cada una de mis decisiones y bríndame un gran apoyo emocional durante todo este proceso.

A mis amigos quienes me brindaron su confianza y apoyo incondicional.

Agradecimientos

Agradecer a mi familia, por todo su apoyo desde el día uno en que decidí estudiar esta carrera, que a pesar de la gran distancia que nos separa y de no poder verlos ni compartir a diario, siempre han querido lo mejor para mí.

Agradecer a mi padre por creer en mí, por su especial apoyo, motivación y consejos que me han ayudado bastante a la largo de la carrera, agradezco a mi padre ya que lograre ser un profesional al igual como lo es él. Gracias a mi padre Héctor Gonzalo Lanas Soto por estar siempre para mí.

Agradecer a mi madre, pilar fundamental en mi vida que gracias a todo su cariño, comprensión y respeto, ha hecho de mí una persona con grandes valores personales y que gracias a todo su apoyo incondicional he podido superar todas aquellas situaciones difíciles por las que he pasado en los últimos años. Gracias a mi madre Nancsy del Mercedes Soto Meza por estar siempre para mí.

Agradecer a la familia Orellana-Quiroz, por haberme acogido durante la gran mayoría de mi estadía en Santiago, gracias por todo su apoyo, cariño y por haberme acompañado durante todo este tiempo. Gracias a Sofía Francisca Arenas Orellana, María Eugenia Orellana Quiroz, Ana María Orellana Quiroz, Amelia Paz Rojas Orellana, Violeta Quiroz Vega, Arnaldo Orellana Lascano, sin ustedes todo esto hubiese sido de manera muy distinta, gracias de todo corazón.

Como olvidar a mis compañeros y amigos de universidad, gracias a ustedes mi pasadía durante la carrera fue de las mejores experiencias que me ha tocado vivir, agradezco su confianza y apoyo. Un nombramiento especial a mi gran amigo Diego Barrera.

Aprovecho de agradecer también a mis amigos de toda la vida, a Javier Saldivar, Diego Álvarez y Gabriela Inzunza, gracias por todos estos años de risas, apoyo y amistad inquebrantable.

Un especial agradecimiento a mi profesor guía el Dr. Roberto Acevedo por ayudarme a la realización de esta memoria de título.

Por último quisiera gradecer a mis profesores quien fueron parte fundamental de mi desarrollo académico, al Dr Andrés Soto Bupert, al profesor Jaime Calderón, al profesor Vlamir Muñoz y al profesor Cristian Valdés.

Resumen

En este trabajo se investigaron las principales técnicas de la perforación y tronadura que se utilizan en la actualidad para la realización de estos procesos unitarios, el propósito de la investigación fue conocer y analizar a detalle las herramientas y equipamiento de cada uno de los procesos, para encontrar aspectos claves de mejoras y/o complemento de los procesos operativos mediante el uso e implementación de nuevas tecnologías.

Previo a la investigación de las tecnologías se realizaron estudios para ver si su implementación es factible a futuro en Chile, comenzando con un estudio geológico del territorio para comprender las propiedades y tipo de rocas predominantes, se analizaron los parámetros principales de diseño de ambos procesos con el fin de destacar su importancia en entorno al diseño y calculo adecuado que tienen los actuales parámetros y que son los que deberían tener las nuevas tecnologías que se integren a la industria. Se considero conocer e investigar los principales riesgos medio ambientales asociados a estos procesos y de cómo poder evitarlos o minimizarlos, realizando un apartado de los impactos e indirectos y estrategias de mitigación, a fin de tener en consideración que los nuevos procesos o tecnologías no perjudiquen al medio ambiente si no que sean de ayuda para que la minería siga con constantes cambios tecnológicos.

Se investigaron en específico 4 nuevas tecnologías con diferentes tipos de funcionamiento y de implementación, destacando también su importancia dentro del contexto del trabajo y mencionando sus respectivas ventajas, si bien 3 de ellas, han tenido relevancia dentro de la industria minera, ya que se encuentran mediante implementadas dentro de algunos procesos operativos con respecto a la perforación y tronadura no han tenido gran renombre, por ello se incluyeron dentro del estudio ya que de igual manera aportan de manera positiva y tener conocimiento de cada una ellas es parte fundamental para continuar con el mejoramiento continuo, estas tecnología son georadares, Sandvik iSURE, Big Data. La tecnología restante es un tema netamente investigativo ya que en Chile no hay vestigio de pruebas piloto o de implementación realizadas, si bien la tecnología con láseres en perforación cuenta con limitaciones técnicas y de costos, estudios realizados en otras partes del mundo han demostrado su eficacia con respecto a varios aspectos como precisión, calidad y versatilidad, los cuales se encuentran desarrollados en este trabajo.

Por último se realizó una propuesta de implementación para esta última tecnología, incluyendo una estrategia general de cómo podría su integración a la industria, teniendo en cuenta sus consideraciones y recomendaciones para que esta implementación sea forma eficiente.

Palabras Claves: Nuevas tecnologías – Perforación y Tronadura – Tecnología laser

Abstract

Summary

This work investigated the main techniques of drilling and blasting that are currently used for the realization of these unitary processes; the purpose of the research was to know and analyze in detail the tools and equipment of each of the processes, to find key aspects of improvements and/or complement of the operational processes through the use and implementation of new technologies.

Prior to the research of the technologies, studies were carried out to see if its implementation is feasible in the future in Chile, starting with a geological study of the territory to understand the properties and type of predominant rock. The main design parameters of both processes were analyzed in order to highlight their importance in terms of the design and adequate calculation that the current parameters have, and that is what the new technologies that integrate into the industry should have. It is considered to know and investigate the main environmental risks associated with these processes and how to avoid or minimize them, making a section on impacts and indirect and mitigation strategies in order to take into account that new processes or technologies do not harm the environment but help mining to continue with constant technological changes.

Four new technologies with different types of operation and implementation were specifically investigated, highlighting their importance within the context of the work and mentioning their respective advantages, although three of them have had relevance within the mining industry since they are implemented within some operational processes with respect to drilling and blasting have not had great popularity. For this reason, they were included in the study since they also contribute in a positive way and having knowledge of each one is essential to continue with the continuous improvement, these technologies are geo radars, Sandvik iSURE, Big Data. The remaining technology is a purely investigative topic since, in Chile, there is no vestige of pilot tests or implementation carried out, although the technology with lasers in drilling has technical and cost limitations; studies carried out in other parts of the world have demonstrated their effectiveness concerning various aspects such as precision, quality and versatility, which are developed in this work.

Finally, an implementation proposal was made for this latest technology, including an overall strategy of how it could be integrated into the industry, considering its considerations and recommendations for this implementation to be efficient.

Keywords: New technologies - Drilling and Blasting - Laser technology

Contenido

Agradecimientos.....	v
Resumen.....	vi
Abstract.....	vii
Índice de Figuras.....	xii
Índice de tablas.....	xiv
1. Introducción.....	1
2. Objetivos.....	3
2.1 Objetivo General.....	3
2.2 Objetivos Específicos.....	3
3. Metodología.....	4
3.1 Recopilación de antecedentes bibliográficos.....	4
3.2 Investigación de las principales técnicas, equipamientos y herramientas para la Perforación y Tronadura.....	4
3.3 Estudio geológico y diseño de los principales parámetros en Perforación y Tronadura.....	4
3.4 Analisis de seguridad y medioambiente.....	5
3.5 Investigación y análisis de las nuevas tecnologías seleccionadas.....	5
3.6 Propuesta de implementación.....	5
4. Actuales técnicas y herramientas utilizadas en la perforación y tronadura.....	6
4.1 Tipos de Perforación.....	6
4.1.1 Perforación Manual.....	7
4.1.2 Perforación Neumática.....	8
4.1.3 Perforación Hidráulica.....	11
4.1.4 Perforación Eléctrica.....	13

4.2 Equipamiento para la Perforación	14
4.2.1 Tipos de Brocas	15
4.2.2 Tipos de Barras.....	18
4.3 Sistemas de Aire Comprimido	22
4.4 Materiales y Equipamiento para Tronadura	23
4.4.1 Explosivos.....	23
4.4.3 Líneas de detonación.....	27
5. Estudio geológico y Diseño de parámetros de la Perforación y tronadura	28
5.1 Estudio Geológico	28
5.1.1 Zona Norte Grande	29
5.1.2 Zona Norte Chico.....	31
5.1.3 Zona Central	33
5.1.4 Zona Sur	35
5.1.5 Zona Austral.....	38
5.2 Diseño de Malla de Perforación	41
5.3 Cálculo de Carga	43
6. Seguridad y Medio Ambiente.....	45
6.1 Seguridad Ambiental	45
6.2 Monitoreo de Vibraciones.....	46
6.3 Manejo de Detritos, Polvo en suspensión y Sustancias peligrosas.....	48
6.4 Protocolos de Seguridad	50
6.5 Impacto Ambiental.....	52
6.5.1 Impactos Directos	53
6.5.2 Impactos Indirectos.....	54
6.5.3 Estrategias de Mitigación	55

7. Nuevas Tecnologías	56
7.1 Extracción por Láser	56
7.2 Sandvik i-Sure.....	63
7.2.1 Herramientas y funciones	64
7.2.2 Analisis MWD.....	65
7.3 Tecnología de Georradar	68
7.3.1 Funcionamiento de un GPR.....	68
7.3.2 Consideraciones al momento de utilizar georadares	71
7.3.3 Importancia para Perforación y Tronadura.....	73
7.4 Integración de Big Data y Analítica Avanzada.....	76
7.4.1 Big Data y Analítica de avanzada en los procesos unitarios de Perforación y Tronadura.....	77
8. Propuesta de una estrategia de implementación	80
8.1 Estrategia de implementación	81
8.1.1 Analisis y Evaluación previas	81
8.1.2 Selección y pruebas de laboratorio.....	82
8.1.3 Diseño y Control	82
8.1.4 Fases Piloto	82
8.1.5 Documentación legal y Evaluación de Impacto	83
8.1.6 Capacitaciones y Formación técnica	83
8.2 Consideraciones y Recomendaciones	83
9. Conclusiones.....	85
10. Referencias	87
11. Anexos.....	91
Anexo 1: Tabla de las medidas de seguridad para el control prevención.....	91

Anexo 2: Tabla de los limites permisibles para piel y ojos (Longitud de onda de 320 nm a 400 nm).....	92
Anexo 3: Tabla de los tiempos máximos de exposición permitido para la piel y ojos (Longitud de onda de 200nm a 315 nm).	93
Anexo 4: Tabla de Permeabilidad relativa (ϵ_r) y velocidades de propagación de la OEM.....	94
Anexo 5: Tabla de las especificaciones técnicas del Georadar Leica DS2000 ..	95
Anexo 6: Espectroscopia laser.....	95
Anexo 7: Espectro Electromagnético	98
Anexo 8: Tabla de medidas de aceleración de la vibración y sus grados de percepción.	102

Índice de Figuras

Figura 1. Perforadora Down The Hole (DTH) (Epiroc, s.f).....	7
Figura 2. Perforación neumática en minería de subterránea (Revista Seguridad Minera, 2017)	9
Figura 3. Perforadora Hidráulica Jumbo CYTJ45 (HUATAI, s.f)	12
Figura 4. Perforadora Eléctrica Jumbo DD422iE (SANDVIK, s.f).....	13
Figura 5. Broca de Botones (MVM Supplies, s.f).....	15
Figura 6. Broca de Triconos (El Dorado Drilling Tools s.f)	16
Figura 7. Brocas Diamantadas (Distribuciones Pako, s.f)	17
Figura 8. Brocas para Martillo de fondo (STENUIK International, s.f)	17
Figura 9. Barras de Perforación Integrales (GMD, s.f)	19
Figura 10. Barras de Perforación de Pared Delgada (Xizuan, s.f).....	20
Figura 11. Barras de Perforación de Pared Gruesa (Wuxi Caston Drill Tools Co. Ltd, s.f)	20
Figura 12. Barras de Perforación Hexagonales (GMD, s.f)	21
Figura 13. Barras de Perforación Diamantina Wireline (Vilong, s.f)	22
Figura 14. SIG de las franjas metalogénicas y principales yacimientos, Modificado (Chile Polimetálico, 2020)	30
Figura 15. SIG de las franjas metalogénicas y principales yacimientos, Modificado (Chile Polimetálico, 2020)	32
Figura 16. SIG de las franjas metalogénicas y principales yacimientos, Modificado (Chile Polimetálico, 2020)	34
Figura 17. SIG de las franjas metalogénicas y principales yacimientos, Modificado (Chile Polimetálico, 2020)	36
Figura 18. SIG de las franjas metalogénicas y principales yacimientos, Modificado (Chile Polimetálico, 2020)	39
Figura 19. Leyenda de las figuras 14-15-16-17-18, Modificado (Chile Polimetálico, 2020).....	40
Figura 20. Elementos o secciones de un plan de contingencia (SERNAGEOMIN, 2020).....	52

Figura 21. Esquema de funcionamiento de un georadar (OER commons, 2019) .	69
Figura 22. Georadar X3M (Huella Minera, 2016)	71
Figura 23. Georadar Leica DS2000 (Leica GeoSystem, s.f)	75
Figura 24. Modelo conceptual de la aplicación del Big Data en los procesos productivos en minería (Beauchef Minería, 2020).....	76
Figura 25. Diseño de Sistema de Perforación con láser de fibra óptica (Arthur Braga, PUC RIO, 2013)	81

Índice de tablas

Tabla 1: Límites permisibles para exposiciones oculares directas por haz de láser.	62
Tabla 2: Límites permisibles para la exposición de la piel a un haz láser.	63
Tabla 3. Propiedades dieléctricas de los principales materiales encontrados en la naturaleza.....	72
Tabla 4: Tipos de antenas y su relación con la frecuencia, resolución, objetivo y profundidad.	73
Tabla 5: Resumen de Ventajas y Desventajas del uso de los GPR.....	74

1. Introducción

La industria minera ha sido uno de los pilares fundamentales del desarrollo económico y tecnológico de Chile. Con el título de ser el principal productor de cobre en el mundo, la minería chilena ha requerido de técnicas avanzadas y especializadas para la extracción eficiente de minerales, especialmente en yacimientos de gran profundidad o de difícil acceso. Dentro de estas técnicas, la perforación y la tronadura ocupan un lugar destacado, siendo esenciales para el proceso de explotación minera.

La perforación es el proceso mediante el cual se realizan orificios en la roca con el objetivo de insertar cargas explosivas que permitan fracturarla y facilitar su extracción. Para llevar a cabo este proceso, se utilizan máquinas perforadoras de diferentes tipos y capacidades, dependiendo del tipo de roca y de las condiciones del yacimiento. Las técnicas de perforación han evolucionado significativamente con el tiempo, y en el contexto chileno, la búsqueda constante de innovaciones ha llevado al desarrollo y adopción de maquinaria de alta precisión y eficiencia, como las perforadoras de rotopercusión y las DTH (Down The Hole).

Una vez realizada la perforación, se procede a la tronadura. Esta técnica consiste en la detonación de explosivos colocados estratégicamente dentro de los orificios perforados. El objetivo es fracturar la roca de manera controlada para facilitar su remoción y transporte. La tronadura debe ser cuidadosamente planificada para garantizar la seguridad, optimizar la fragmentación de la roca y minimizar la vibración y los impactos ambientales.

En Chile, el manejo y uso de explosivos en la minería está rigurosamente regulado por la Gendarmería de Chile, y las empresas deben cumplir con normativas específicas que buscan proteger tanto a los trabajadores como al medio ambiente.

La minería Chile, con sus vastos yacimientos mineros, ha enfrentado desafíos geológicos y tecnológicos que han impulsado la innovación en áreas como la perforación y la tronadura. La geografía particular del país, con yacimientos ubicados tanto en la alta montaña andina como en zonas desérticas, ha exigido soluciones adaptadas a cada contexto.

“El caso del yacimiento de Chuquicamata, uno de los más grandes del mundo, es un ejemplo ilustrativo. Ubicado en pleno Desierto de Atacama, ha requerido la implementación de técnicas avanzadas de perforación y tronadura para garantizar la eficiencia en la extracción y el respeto por el medio ambiente” (Codelco, 2020).

La minería se encuentra en constante cambios tecnológicos y su compromiso con adaptarse a los nuevos tiempos ha sido clave para que se implementen nuevas tecnología con un propósito específico, mejorar la eficiencia de sus procesos para poder aumentar su productividad al largo plazo, teniendo en cuenta un especial cuidado hacia el medio ambiente, por ello la búsqueda de tecnologías que ayuden a minimizar el impacto producido en la industria minera son fundamentales para exista una sostenibilidad ambiental de manera equilibrada y armoniosa.

“Un estudio del World Economic Forum sobre los impactos de la transformación digital en la industria minera, indica que la digitalización podría generar más de US\$ 427 mil millones de valor para la industria y sociedad en la década que viene a nivel mundial, de los cuales más de US\$ 106 mil millones son para la sociedad, que se pueden medir en reducción de emisión de CO₂, en disminución de vidas perdidas y de accidentes, en un menor consumo de agua y en una menor contaminación del suelo”(ACTI, 2021)

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

- Evaluar las actuales técnicas y herramientas utilizadas en perforación y tronadura.

2.2 Objetivos Específicos

- Análisis de seguridad y medio ambiente sobre las actuales técnicas de perforación y tronadura, con sus respectivos impactos medioambientales.
- Analizar las potenciales tecnologías inteligentes aplicables y su relevancia en el contexto minero.
- Determinar las ventajas operacionales, económicas y ambientales de implementar dichas tecnologías.
- Proponer una estrategia de implementación basada en el análisis previo.

3. Metodología

3.1 Recopilación de antecedentes bibliográficos.

Esta etapa consiste en recopilar información de las actuales técnicas para la perforación y tronadura en Chile, a su vez también se recopiló información de las principales nuevas tecnologías para dichos procesos. Las fuentes principales utilizadas para el estudio realizado fueron las siguientes:

- Publish.
- Researchgate.
- Scencedirect.
- Scielo.
- Publicaciones de nuevas tecnologías de la Minería Chilena.
- Academia edu

3.2 Investigación de las principales técnicas, equipamientos y herramientas para la Perforación y Tronadura.

Esta etapa se basa en investigar las principales técnicas utilizadas en la perforación, en donde se destacaron ventajas y desventajas de los tipos de perforaciones existentes y se mencionarán las principales herramientas y equipos comúnmente seleccionados para el proceso, por el lado de las tronaduras se destacarán los principales explosivos y equipamiento para llevar a cabo el proceso.

3.3 Estudio geológico y diseño de los principales parámetros en Perforación y Tronadura.

En este apartado se considera la realización de un estudio general del territorio chileno, con el fin de conocer los principales tipos de roca existentes a lo largo de todo territorio para luego analizar si algunas de las nuevas tecnologías seleccionadas son aptas para su integración. En relación al

diseño se analizaron dos parámetros fundamentales para la perforación y tronadura, destacando la importancia de tener un buen diseño y factores a tener consideración para ambos procesos, incluyendo recomendaciones.

3.4 Analisis de seguridad y medioambiente.

Se investigarán los principales riesgos asociados y protocolos de seguridad dentro de los procesos unitarios de la perforación y tronadura, teniendo en consideración los impactos que estos producen y de cómo poder evitarlos o minimizarlos, sobre todo cuando se intentan implementar a futuro nuevas tecnologías para los procesos seleccionados. Se mencionarán los principales impactos relacionadas a la industria minera y la entidad encargada de que los sistemas de evaluación, regulaciones y normativas se cumplan dentro de la industria minera.

3.5 Investigación y análisis de las nuevas tecnologías seleccionadas

Esta etapa consiste en investigar cada una de las tecnologías para su respectivo estudio, se incluyeron sus ventajas principalmente, su importancia para el contexto principal del trabajo, se mencionarán sus funcionamientos y principios básicos para lograr integrarlas de mejor manera dentro de la industria minera.

3.6 Propuesta de implementación.

Esta última etapa consiste en proponer una estrategia de implementación general considerando puntos claves para que la integración de la nueva tecnología sea de forma efectiva, se presenta un diseño de la tecnología seleccionada extraído de un estudio realizado en Brasil y se incluyen recomendaciones y consideraciones.

4. Actuales técnicas y herramientas utilizadas en la perforación y tronadura

La minería ha sido una de las industrias primordiales en el desarrollo de muchas economías a lo largo de la historia. En particular, los procesos de perforación y tronadura son esenciales para la explotación eficiente de minerales. Ambos procedimientos requieren un enfoque meticuloso y la correcta utilización de herramientas y técnicas. A continuación, se presentan los elementos y técnicas esenciales en ambos procesos:

4.1 Tipos de Perforación

Los tipos de perforación van dependiendo de la profundidad, tipo de roca y condiciones geológicas, se selecciona el tipo de perforadora. Las más comunes son las de rotopercusión y las DTH (Down-The-Hole). Debido de a esto se debe analizar de manera meticulosamente las propiedades de las rocas para luego realizar una serie de perforaciones, lo que se conoce como la malla de perforación y que esta dependerá de las dimensiones de la galería o del banco en que se esté empleando la labor.



Figura 1. Perforadora Down The Hole (DTH) (Epiroc, s.f)

Seguidamente se presentarán los diferentes tipos de perforación existentes actualmente en Chile:

4.1.1 Perforación Manual

El proceso se lleva a cabo utilizando un barreno que sirve para facilitar la extracción y el movimiento. El barreno es sostenido por el ayudante mientras que el otro lo golpea con una comba para así hacer girar un cierto ángulo para continuar con el proceso de perforación. En este tipo de perforación se emplean equipos de dimensiones más pequeñas debido a que se aplican en labores de menor envergadura. Cabe destacar que este proceso en si también se puede realizar por una sola persona, en lo que se conoce como minería artesanal.

Las ventajas de la perforación manual se mencionan a continuación:

- Bajos Costos de los equipos: las herramientas y equipos utilizados son de bajos costos, por lo que se necesita de una inversión baja.

- Accesibilidad: utilizadas en lugares con difícil acceso o en lugares remotos en donde la maquinaria pesada no puede entrar debido a las dimensiones pequeñas del túnel.

En cuantos a las desventajas tenemos:

- Profundidad y limitaciones técnicas: la profundidad y la precisión son muy limitadas debido a que a mayores profundidades los equipos dejan de útiles para seguir operando.
- Baja Eficiencia: al ser un método tan antiguo es menos eficiente si lo comparamos con las técnicas mecanizadas actuales.
- Seguridad: los riesgos asociados son altos y ponen en peligro la salud e integridad de los operadores.

4.1.2 Perforación Neumática

Este tipo de perforación emplea una perforadora convencional que usa la energía proveniente del aire comprimido que se le suministra al equipo para que accione el martillo neumático que golpea a una broca y que así se vayan realizando pequeños agujeros en la superficie de la roca.

La seguridad de este tipo de perforación es fundamental ya que existe un alto de grado de ruido que es perjudicial para el oído humano si se está expuesto mucho tiempo, otro aspecto son los desprendimientos de los diferentes tamaño de roca que pueden golpear a los operadores mientras realizan sus labores diarias de perforación, por ello utilizar los EPP como protectores auditivos, cascos, lentes de seguridad, respiradores, entre otros; es primordial tener acceso a estos elementos y se deben de utilizar para disminuir los riesgos asociados a este tipo de perforación.

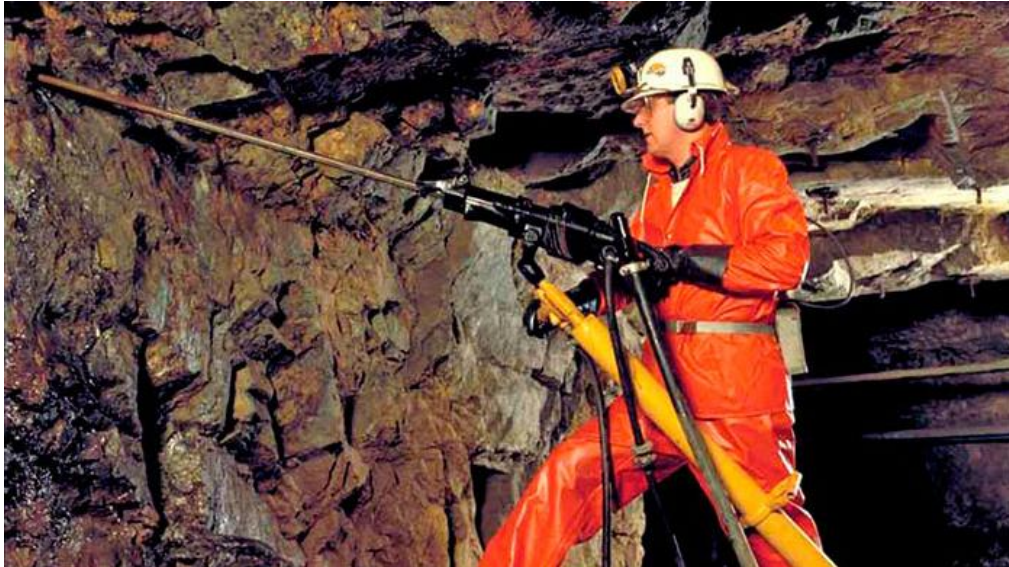


Figura 2. Perforación neumática en minería de subterránea (Revista Seguridad Minera, 2017)

La ventaja general de la perforación neumática es:

- Posee una alta eficiencia en rocas con dureza alta, las mantenciones que deben realizarles a los equipos son menores en comparación con los equipos de perforación hidráulicas, por ultimo los equipos son más ligeros y pueden movilizarse o trasladarse de manera más rápida.

Su desventaja es la siguiente:

- Produce mucho polvo y ruido, tienen una menor eficiencia energética si se comparan con las perforadoras eléctricas, además deben contar con un suministro de aire comprimido constante para poder operar.

La perforación neumática cuenta con tipos de métodos para emplear sus funciones, los cuales se describirán a continuación:

Método Rotativo: Este método se subdivide en los partes, la primera es según la penetración de la broca en la roca la cual se realiza por trituración de los triconos y la segunda es por corto, este último utiliza brocas especiales. La primera subdivisión se utiliza para rocas de dureza media a alta y la segunda

es utilizada para rocas de dureza baja o blandas. En el método de perforación rotativo no existe la percusión en consecuencia de esto existe la subdivisión.

Este método cuenta con las siguientes ventajas:

- Velocidad: tiene tasas de perforación más altas cuando tiene que perforar rocas blandas y rocas de dureza media.
- Versatilidad: practico para poder utilizarlo en diferentes tipos de terreno y en variedades tipos de roca.
- Muestreo: capaz de entregar muestras de forma continua del subsuelo.

Las desventajas que posee son las siguientes:

- Condiciones duras: en rocas duras la tasa de perforación resulta ser más lenta.
- Profundidad limitada: las perforaciones a altas profundidades resultan ser menos eficientes.
- Desgastes: Las brocas y las barras suelen desgastarse de manera más rápida en condiciones extremas.

Método Rotopercutivo: Es uno de los más utilizados en minería a cielo abierto como en minería subterránea y es debido a que en este método de perforación usa una combinación de la acción de percusión, empuje, rotación y barrido, lo que hace que la perforación en la roca se más efectiva y eficaz.

Las ventajas de este método son las siguientes:

- Se aplica a todo tipo de roca ya sean blandas o duras.
- Se puede usar una amplia gama de diámetros de perforación.
- Los equipos tienen gran movilidad y pueden ser operados por una sola persona.

Otras ventajas de este método son las siguientes:

- Perforación en rocas con alta dureza: permite realizar una perforación eficiente y eficaz en rocas duras.
- Profundidad: Se pueden lograr mayores alcances en cuanto a la profundidad de la perforación, en comparación con el método rotativo.
- Resistencia: el desgaste de las brocas de este método es menor cuando se enfrenta a situaciones de mayor dificultad, es menos susceptible.

A continuación se mencionarán las desventajas:

- Costos: al ser un método más sofisticado, requiere de más energía, lo que se traduce como mayores costos de operativos.
- Velocidad: en general es más lento que el método rotativo en formaciones rocosas de durezas más blandas o medianamente duras.
- Muestreo: el daño producido por la percusión afecta directamente en la calidad de la muestra que se desee realizar para sus estudios posteriores.

4.1.3 Perforación Hidráulica

La energía hidráulica es la tecnología que se emplea en este tipo de perforación la cual utiliza agua para la transmisión, el movimiento y la fuerza para alimentar la percusión del martillo. La perforación hidráulica es utilizada en equipos de equipos de gran capacidad y que a su vez son más sofisticados, estos que equipos cuentan con un tablero digital computarizado que mediante su software pueden proyectar la sección de la malla de perforación que desea realizar. En cuanto a las ventajas principales podemos destacar su gran precisión, velocidad de perforación y su mejor eficiencia energética en comparación de otros tipos de perforación.



Figura 3. Perforadora Hidráulica Jumbo CYTJ45 (HUATAI, s.f)

Las ventajas que posee este tipo de perforación son:

- Flexibilidad: tienen la capacidad de poder trabajar en condiciones difíciles y en una amplia variedad de materiales.
- Potencia: este tipo de perforadoras suelen ser más potentes que las perforadoras eléctricas.
- Fiabilidad: son más fiables y resistentes en entornos adversos donde hay aguas y polvo en suspensión.

Las desventajas que tiene son las siguientes:

- Peso: al ser equipos pesados, se demoran más en trasladarse hacia otros sectores.
- Costos: en cuanto a la inversión inicial y los mantenimientos asociados, el costo es elevado.
- Impacto ambiental: generan un mayor impacto debido al uso de fluidos hidráulicos.

4.1.4 Perforación Eléctrica

Emplea energía eléctrica la que proviene de un generador el cual es impulsado por grandes motores eléctricos de bajo consumo, la perforadora utiliza un barreno helicoidal que le permite realizar huecos de hasta 90 cm de longitud. Las perforadoras eléctricas suelen tener precios más elevados en comparación a las perforadoras mecánicas, a su vez también las mantenciones y sus componentes suelen ser más costosas, pero los beneficios de contar con este tipo de perforadoras es que al no requerir combustible Diesel no contaminan al ambiente y en espacios cerrados no es necesario tener en funcionamiento constante los sistemas de ventilación a interior mina ya que durante el acarreo producen cero emisiones de CO₂ y en general tienen una mayor productividad.



Figura 4. Perforadora Eléctrica Jumbo DD422iE (SANDVIK, s.f)

Dentro de las ventajas se pueden destacar las siguientes:

- Eficiencia energética: energéticamente son más eficientes y ofrecen menores costos operativos.

- Movilidad: por lo general son equipos un poco más ligeros y fáciles de movilizar en comparación con las perforadoras hidráulicas.
- Menor impacto ambiental: generan un menor impacto si utilizan fuentes de energía renovables.

Las desventajas de la perforación eléctrica se describen a continuación:

- Dependencia eléctrica: necesitan tener energía de manera constante para poder operar y si una fuente de energía cercana no funcionaría de manera correcta.
- Menor potencia: si se les compara con perforadoras hidráulicas, estas poseen menor potencia.
- Limitaciones operativas: en condiciones de trabajos extremo suelen no ser adecuadas.

4.2 Equipamiento para la Perforación

Estos elementos determinan la precisión y eficiencia del proceso de perforación, estos deben ser seleccionados en función del tipo de roca a perforar. Las brocas o bits son piezas fundamentales para la perforación ya que son las encargadas de perforar el macizo rocoso y dependiendo del tipo de roca se utilizan diferentes tipos de brocas, cada una ellas están diseñadas para cada material en específico y para efectuar diferentes tipos de agujeros. El material del cual están hechas son extremadamente duros, algunos de ellos son de acero, carburo de tungsteno entre otros, estas piezas son añadidas al final del barreno en donde realizan el corte y la perforación de la roca.

4.2.1 Tipos de Brocas

- Broca de botones

Son utilizadas comúnmente para perforar rocas duras y muy duras debido que a las aleaciones o “botones” están fabricadas con carbono de tungsteno, el resto es de un trozo de barra de acero de alta calidad.



Figura 5. Broca de Botones (MVM Supplies, s.f)

- Brocas de Cono

Piezas ampliamente utilizadas en minería para realizar agujeros de dimensiones de gran diámetro en rocas duras y abrasivas, también son conocidas como brocas de tricono. Proporciona buena estabilidad y son capaces de perforar una amplia variedad de formaciones rocosas.



Figura 6. Broca de Triconos (El Dorado Drilling Tools s.f)

- Brocas Diamantadas

Poseen una alta capacidad para realizar perforaciones en rocas de dureza duras debido a que los diamantes sintéticos de alta calidad están colocados de manera meticulosa y se distribuyen de forma uniforme a lo largo de la matriz de la corona de la broca.



Figura 7. Brocas Diamantadas (Distribuciones Pako, s.f)

- Brocas de Martillo en fondo

Estas trabajan con el martillo en fondo el que es accionado por aire comprimido para así perforar rocas de dureza alta. Las brocas de martillo en fondo son utilizadas por las perforadoras Down The Hole (DTH)



Figura 8. Brocas para Martillo de fondo (STENUIK International, s.f)

4.2.2 Tipos de Barras

Las Barras de perforación son barras huecas cuya función principal es transmitir la fuerza giratoria de empuje proveniente del equipo hacia la broca o tricono, también permiten el paso de los fluidos que son producidos cuando se está realizando la labor de perforación. Existen una gran variedad de tipos de barras las cuales tienen diferentes usos, por ello son fabricadas con diferentes materiales y formas para realizar en conjunto con las brocas diferentes tipos de abertura de la roca. Algunas de estos tipos de barras de mencionaran a continuación:

- **Barras de Perforación Integrales**

Son piezas fabricadas de acero de alta dureza y de carbono de tungsteno que no necesitan de alguna unión o acople, como triconos o brocas. Son usadas en perforaciones cortas y en trabajos de tronadura en la mayoría de los casos debido a la simplicidad de su diseño y su robustez.



Figura 9. Barras de Perforación Integrales (GMD, s.f)

- Barras de Perforación de pared delgada

Son barras más ligeras debido a que poseen una menor cantidad de material en la pared del tubo haciendo que sean más delgadas, debido a esto son utilizadas para obtener muestras del subsuelo con menores esfuerzos del equipo perforante en las etapas de exploración.



Figura 10. Barras de Perforación de Pared Delgada (Xizuan, s.f)

- Barras de Perforación de pared gruesa

La pared del tubo tiene grosor mayor y son más robustas, en comparación con las de pared delgada. Su uso es requerido en perforaciones más profundas y condiciones más extremas.



Figura 11. Barras de Perforación de Pared Gruesa (Wuxi Caston Drill Tools Co. Ltd, s.f)

- **Barras de Perforación Hexagonal**

Estas barras tienen una sección transversal hexagonal, son rígidas y pesadas pero logran transmitir la energía con mayor eficacia, también proporcionan un buen lavado. En general son utilizadas para perforar rocas duras ya que su forma hexagonal proporciona un mayor torque y resistencia al giro.



Figura 12. Barras de Perforación Hexagonales (GMD, s.f)

- **Barras de Perforación Diamantina**

Las barras diamantinas están fabricadas de tubos de acero al carbono sin costura de alta calidad, estas incorporan una broca diamantina en un extremo de la barra. Se utilizan para perforar rocas de alta dureza, también se utilizan para obtener núcleos de muestra en la exploración del mineral.



Figura 13. Barras de Perforación Diamantina Wireline (Vilong, s.f)

4.3 Sistemas de Aire Comprimido

Facilitan la eliminación de detritos durante la perforación, permitiendo una perforación más limpia y efectiva. Estos son un parte fundamental en operaciones mineras, independiente si gran minería, mediana minería o pequeña minera.

En gran minería los sistemas utilizados de aire comprimido son utilizados en gran parte de las operaciones, tales como en perforación cuando se ocupan los equipos de maquinaria pesada, en ventilación, entre otros. Si tenemos en cuenta la envergadura y profundidad de las minas, los sistemas y equipos de aire comprimido en su mayoría son más complejos y extensos, además requieren de mantenimientos más regulares y un alto nivel de monitoreo. En cuanto a la tecnología empleada estos son más eficientes en términos de energía y a su vez son más tecnológicos, debido a esto requieren de una inversión mayor.

Para la mediana minería los equipos y sistemas de aire comprimido son utilizados en las mismas labores pero en menor cantidad, los sistemas

utilizados son menos complejos por lo que requieren menos mantenimiento pero para ellos de estar monitoreados de igual manera. En mediana minería emplea una mezcla de tecnologías avanzada y tradicionales, por lo que su inversión es variable y depende netamente de los recursos que se tienen disponibles.

Por último en pequeña minería el aire comprimido se utiliza principalmente en la perforación neumática, en pocos casos en ventilación. Debido a la escala de operaciones los equipos de aire comprimido resultan ser más sencillos y de capacidad mucho menor. La tecnología utilizada es más tradicional o las que son económicamente rentables, por ello se requiere de una inversión inicial menor.

4.4 Materiales y Equipamiento para Tronadura

4.4.1 Explosivos

Los explosivos a nivel químico son sustancias químicas que tienen un grado de inestabilidad en los enlaces atómicos de sus moléculas que al ser expuestos a ciertos impulsos externos generan una reacción rápida de disociación, las reacciones producidas son de tipo oxido- reducción y están inducidas térmicamente por los denominados “puntos calientes”, el resultado de esta reacción genera gases de alta presión y de temperatura que producen una onda de compresión que es la que finalmente logra fragmentar el macizo rocoso. Existen diferentes tipos, y su selección depende de las características de la roca y las condiciones geológicas. Los más comunes incluyen ANFO, hidrogeles, dinamita y emulsiones.

ANFO (Ammonium Nitrate-Fuel Oil): el contenido este explosivo son nitrato de amonio o los denominados prills de nitrato de amonio y la otra parte está compuesta por un combustible. El ANFO es material granulado el cual tiene

bajo costo y en la actualidad es uno de los más utilizados ya que en cuanto a seguridad es de fácil manejo y tiene un buen rendimiento en rocas muy fracturadas. Existen 3 tipos de ANFOs, los aluminizados, los livianos y los pesados, cada uno con sus composiciones y usos distintos para la operación de tronadura que se requiera.

Hidrogeles: son una mezcla de una solución de oxidantes con nitrato de monometilamina y la adición de diferentes productos sólidos y líquidos, tales como espesantes, oxidantes, etc. Este tipo de explosivos son utilizados en lugares con alta presencia de agua debido a su excelente resistencia a este medio y en formaciones de roca de dureza media-alta por su elevada potencia y velocidad de detonación.

Dinamitas: la composición de este explosivo es al igual que anterior una mezcla de nitroglicerina y nitroglicol coagulado, cabe destacar que dependiendo del tipo de dinamita algunos también contienen nitrato de amonio. Existen dos tipos, las dinamitas pulverulentas y las dinamitas gelatinosas.

Emulsiones: están compuestos principalmente por sales de nitrato amónico con cantidades de contenido agua de alrededor de un 14%, contiene un 4 % de gasoil y en menor porcentajes otros productos de los que se destacan agentes emulsificantes y ceras. Cabe destacar que la emulsiones pueden ser encartuchadas o a granel, e independientemente de ello ambas otorgan una buena resistencia al agua, elevada potencia por sus altas velocidades de detonación y bajos costos.

“Las emulsiones explosivas son del tipo denominado "agua en aceite" en las que la fase acuosa está compuesta por sales inorgánicas oxidantes disueltas en agua y la fase aceitosa por un combustible líquido inmiscible con el agua del tipo hidrocarbonado”. (INACAP, s.f.)

4.4.2 Detonadores y Sistemas iniciadores

Estos dispositivos son esenciales para controlar la detonación de los explosivos. Los sistemas electrónicos modernos permiten una detonación secuencial y controlada para maximizar la eficiencia de la tronadura. La final de estos es enviar la señal a cada pozo o cada agujero perforado para que así se de inicio a la detonación. Los sistemas más utilizados y conocidos en minería son los siguientes.

- Sistemas de iniciación no eléctricos (SINE)

La característica principal de los SINE es su baja velocidad de su onda de choque la cual se propaga por el tubo de plástico hasta el detonador de tipo no eléctrico, la reacción es silenciosa en comparación con otros sistemas y de carácter no muy violento. El SINE se subdivide en 2 grupos

- Sistema no eléctrico tradicional (SINET).
- Sistema no eléctrico no silenciosos (SINES).

En cuanto a los detonadores utilizados en estos sistemas tenemos que el SINET utiliza detonadores no eléctricos y que el SINES utiliza detonadores no eléctricos de retardo de serie MS (milisegundos) y LP (periodos largos).

- Sistemas de iniciación eléctrico

El sistema inicia cuando por efectos de temperatura se inflama la carga explosiva sensible desde el detonador hasta una pequeña resistencia eléctrica de puente, o también conocida como gota de pirotecnia, por lo tanto el sistema se acciona mediante la conversión de electricidad en calor. Las fuentes de energía utilizadas generalmente van desde baterías,

redes de energía eléctrica hasta explosores. Una ventaja por destacar es que cada detonador y circuito completo pueden ser revisados antes de iniciar la labor y que pueden estar bajo control en todo momento cuando inicie la detonación. El tipo de detonador de este sistema es eléctrico.

- Sistemas de iniciación electrónico

Uno de los sistemas más actuales implementados y se inicia mediante el envío de una señal electrónica codificada para dar partida a un tren de retardo, este nuevo sistema con detonador electrónico soluciona los problemas de dispersiones de errores que presentan otros detonadores, como por ejemplo los detonadores no eléctricos. La ventaja de este detonador electrónico es que tienen un funcionamiento autónomo, pueden perfectamente ser testeados y poseen inmunidad a interferencias electromagnéticas (EMI) y a radios frecuencias (RFI).

- Sistemas de iniciación a fuego

Por el contrario de anterior sistema de iniciación este es uno de los más antiguos sistemas de iniciación pero que aun así sigo siendo utilizado sobre todo en pequeña minería. La transmisión es un tren de explosivo recubierto de fibras textiles y plástico, el cual se inicia mediante una mecha de fuego que recorre este cable conocido habitualmente como “cable guía” hacia una carga explosiva (fulminante) ubicada en uno de sus extremos la cual es sensible al calor dando paso así la detonación. La mecha de fuego mencionada anteriormente vendría siendo el detonador de este sistema y según su velocidad de combustión se puede clasificar en:

- Mecha lenta o de seguridad

- Mecha rápida

4.4.3 Líneas de detonación

Utilizadas para conectar y secuenciar mediante las señales que se emiten por este accesorio para iniciar las líneas troncales de la detonación de las diferentes cargas explosivas. Los tipos de líneas de detonación se mencionan a continuación:

La línea de iniciación de detonación por mecha lenta tiene aproximadamente 3 metros de longitud y su velocidad está calculado en 140 segundos por metro de mecha, por lo que en que se quemen los 3 metros pasan alrededor de 7 minutos, los accesorios que componen esta línea de detonación son la mecha o cable guía, el detonador de fuego el cual se conecta a la línea de cordones detonante.

La línea de iniciación de detonador no eléctrico se logra por un tubo de choque que en su extremo tiene un detonador no eléctrico, el cual tiene un conector cuya función principal es retardar e iniciar la línea de cordón de los detonantes. El producto como tal es bastante seguro debido a que el cable guía esta disponibles en carretes en donde viene enrollado.

5. Estudio geológico y Diseño de parámetros de la Perforación y tronadura

5.1 Estudio Geológico

Si analizamos el territorio chileno podemos notar que en cuanto a su longitud es bastante extenso y posee una diversidad geográfica notoria, también se caracteriza por una amplia variedad de formaciones geológicas a lo largo del territorio. Antes de comenzar a mencionar y analizar las diferentes zonas es necesario saber un poco del panorama geológico actual por la cual está pasando Chile ya que la geología como ciencia ha sido una parte fundamental para el desarrollo y conocimiento de los recursos naturales del país, también ha aportado información valiosa sobre los riesgos naturales a los que se enfrenta y de la dinámica del medioambiente. En la actualidad la geología ha ido experimentando un importante cambio en su desarrollo debido a la alta demanda de recursos naturales que se ha impulsado en los últimos años por ende también ha crecido la necesidad de disminuir o mitigar los riesgos naturales asociados y su compromiso con la sostenibilidad ambiental. Si hablamos en el ambiente de los recursos naturales, Chile es un país rico en diversos recursos naturales como cobre, litio, plata, oro, molibdeno entre otros, por consiguiente la geología ha favorecido en gran medida la exploración y posterior explotación de estos recursos bajo una gestión sostenible. Por el lado del ámbito de los riesgos naturales tenemos certeza de que Chile es un país con actividad sísmica activa y volcánica y la geología ha sido esencial para tener comprensión acerca de eventos naturales para así tener y desarrollar medidas preventivas cuando estos sucedan. En cuanto al ámbito de la sostenibilidad ambiental ha ayudado entender que procesos o practicas mineras afectan de manera negativa o positiva al medioambiente.

En Chile podemos reconocer 5 zonas en las que se encuentran las distintas regiones que lo conforman en su totalidad. Las 5 zonas son:

- Zona Norte Grande: En esta zona tenemos las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta.
- Zona Norte Chico: Están las Regiones de Atacama y Coquimbo.
- Zona Central: Aquí nos encontramos con las regiones de Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins y Maule.
- Zona Sur: Aquí están las regiones de Ñuble, Araucanía, Los Ríos y Los Lagos.
- Zona Austral: En esta zona nos encontramos con las regiones de Aysén y Magallanes.

A continuación se darán a conocer las características más importantes que predominan en las zonas y sus respectivas regiones.

5.1.1 Zona Norte Grande

La zona norte grande se extiende desde el límite con Perú hasta río de Copiapó y es la zona más árida del territorio por sus extensos altiplanos y por el desierto de Atacama, uno de los desiertos más seco del mundo, pero esta características tan particular ha sido clave para el desarrollo de unas de las actividades con mayor relevancia del país como lo es la minería, ya que tienen los depósitos más grandes de yacimientos de cobre, litio, entre otros minerales, sumado a esto también se encuentra el Salar de Atacama el mayor depósito salino de Chile.



Figura 14. SIG de las franjas metalogénicas y principales yacimientos, Modificado (Chile Polimetálico, 2020)

XV Región: Arica y Parinacota

Caracterizada por principalmente por la Cordillera de los Andes y por el desierto de Atacama, la región está ubicada en el extremo norte, entre los paralelos 17°13' y 19°14' latitud sur y posee una diversidad e interesante geología de las que se incluyen rocas metamórficas, volcánicas y sedimentarias. Se destacan yacimientos mineros de cobre y oro, los volcanes activos y extintos que alberga la región y sus altiplanos cuyas mesetas se encuentran elevadas, extendiéndose a lo largo de los Andes centrales.

I Región: Tarapacá

La región se caracteriza por su ubicación con la frontera de Perú, abarcando desde los 19°13' hasta los 21°38' latitud sur aproximadamente, aquí la

presencia de la cordillera de los Andes sigue en su extensión y parte del desierto de atacama continúan en la región, tiene en común características similares a la región de Arica y Parinacota de las que se destacan rocas sedimentarias y volcánicas. Cuanta con una historia rica en minería en el pasado por los yacimientos de salitre y en la actualidad la riqueza minera de sector aún sigue presente, en donde extraen minerales como cobre, plata, azufre y sales potásicas.

II Región: Antofagasta

Ubicada en el norte entre los 21°28' hasta 25°55' de latitud sur aproximadamente, la región puede caracterizarse como una zona potencialmente rica en minerales en específico en las cercanías de la ciudad de Calama donde se sitúan dos de las mineras con mayor magnitud y relevancia a nivel mundial, estas son División Chuquicamata perteneciente a la empresa CODELCO y es considerada la minera a cielo abierto más grande del mundo, y la segunda es minera Escondida cuyos dueños son BHP Billiton, Escondida es la minera con mayor producción de concentrados de Cobre a nivel mundial y nacional. En cuanto a la geología del sector podemos distinguir variados tipos de roca y de sedimentos poco consolidados, en referencia a los tipos de roca tenemos rocas sedimentarias continentales cretácicas y rocas jurásicas, cabe destacar que se encuentran también depósitos cuaternarios, marinos y litorales. Por ultimo los minerales que extraen en la zona son cobre, molibdeno, cloruro de litio, nitratos, yodo entre otros.

5.1.2 Zona Norte Chico

La extensión de la zona comprende desde el río de Copiapó hasta el río Aconcagua y es una zona semi árida debido a que cuenta con una parte desértica por la región de Atacama y su gran desierto, pero en la región de Coquimbo se comienza a dar una transición ya que su clima y geología

cambian debido a la presencia de la Cordillera de la Costa. Pero esto no ha impedido a que se desarrolle una baja actividad minera, al contrario la actividad minera de la zona norte chico se ha podido dar buena manera y ha generado una importancia económica y una tradición excepcional en sus valles interiores desde los pirquineros en la pequeña minería hasta en las operaciones mineras a gran escala como Minera Los Pelambres, propiedad de la empresa Antofagasta Minerals.

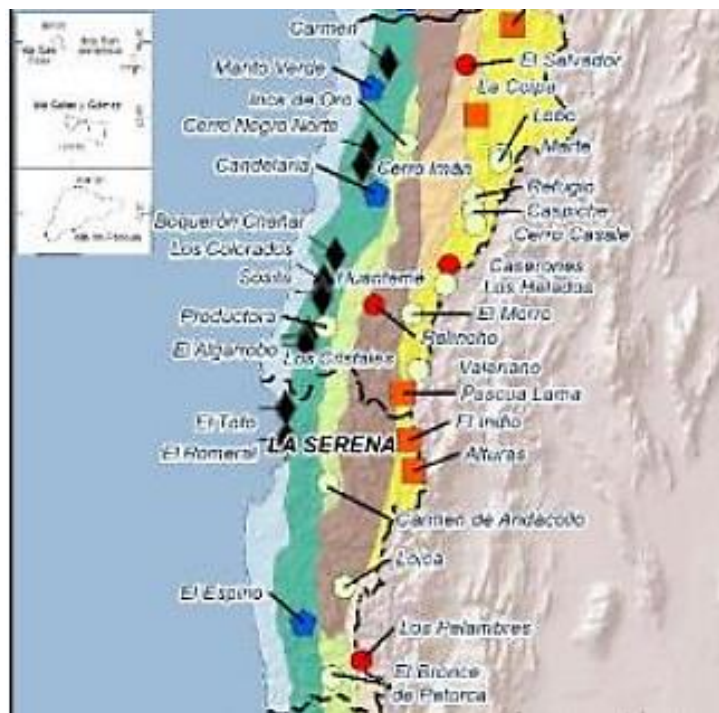


Figura 15. SIG de las franjas metalogénicas y principales yacimientos, Modificado (Chile Polimetálico, 2020)

III Región: Atacama

La región se ubica entre los paralelos 26° y 29°20' de latitud sur y es una las regiones más áridas del territorio chileno, esto es debido a que aquí es donde está la mayor parte del desierto de Atacama. En la geología del sector tenemos rocas magmáticas, sedimentarias siendo continentales o marinas y en menor grado rocas metamórficas estas características geológicas son

debido que la región forma parte del sistema tecto-genético de los Andes. Su riqueza minera es bastante amplia desde recursos metálicos como cobre, litio, plata, hierro, oro, molibdeno entre los más destacados y también recursos no metálicos rocas ornamentales como el cuarzo y recursos silíceos como el cuarzo.

IV Región: Coquimbo

Geográficamente la región se localiza entre los paralelos 29°20' y los 32°15' de latitud sur, esta zona se podría considerar como una transición entre la gran zona desértica del norte a la zona central del país, por lo que podemos decir que la región es una zona semi árida con formaciones estratificadas y sedimentarias marinas. Los minerales extraídos en su mayoría son recursos metálicos como hierro, cobre, oro, plata y manganeso, pero también se extraen en menor cantidad recursos no metálicos tales como calizas, yeso, cuarzo y feldespato, esto es debido a que no se ha desarrollado de la misma magnitud en comparación a los recursos metálicos. Esto ha sido clave para que en región se hayan desarrollados yacimientos mineros y ocurrencias de tipo IOCG (Iron Oxide-Cooper-Gold) y del tipo IOA (Iron Oxide-Apetite).

5.1.3 Zona Central

La zona Central país tiene su extensión desde el Rio Aconcagua por el norte hasta el rio Bio-Bio en su límite hacia el sur, posee una geología diversa formada por rocas sedimentarias y por rocas metamórficas, esto es debido a que está ubicada entre la Cordillera de la Costa y la Cordillera de los Andes. Si bien la minería en la zona no es a la misma escala que la que se encuentra en la zona norte del territorio, cuenta también con depósitos considerables de recursos minerales debido a la geología propia que esta posee. La actividad minera a gran escala se ha desarrollado más en regiones de Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins.



Figura 16. SIG de las franjas metalogénicas y principales yacimientos, Modificado (Chile Polimetálico, 2020)

V Región: Valparaíso

Situada en aproximadamente entre los paralelos $32^{\circ}01'$ y $33^{\circ}57'$ de latitud sur y entre los meridianos 70° y $72^{\circ}W$, la geología de la región es bastante diversa en donde se destacan las formaciones rocosas sedimentarias y volcánicas. La región alberga yacimientos importantes de cobre y de hierro pero también extraen cantidades considerable de oro, molibdeno, plata y plomo, en relación con minería no metálica se destaca la extracción carbonatos de calcio y calizas.

Región Metropolitana

Su ubicación geográfica esta entre los paralelos $32^{\circ}55'$ y $34^{\circ}19'$ de latitud sur y entre los $69^{\circ}47'$ y $71^{\circ}43'$ de longitud oeste, con respecto a sus características geológicas tenemos la presencia de rocas ornamentales como por ejemplo piroclásticas, subvolcánica e intrusivas, de igual manera se encuentran rocas metamórficas, continentales y unidades estratificadas sedimentarias marinas. La región es propensa a una actividad sísmica debido que está ubicada en una zona de subducción. Los minerales que predominan en la zona son el cobre, plata y oro como recursos metálicos, en cuanto a recursos no metálicos se encuentran calizas, yeso, arcillas y caolines.

VI Región: Libertador General Bernardo O'Higgins

Ubicada en la zona centro-sur entre los paralelos 34° y los 35° de latitud sur aproximadamente, en referencia a la geología se puede caracterizar por las formaciones de rocas de las cuales se incluyen volcánicas, granitos y depósitos sedimentarios, en zonas más al sur de la región encontramos rocas de tipo intrusivas, metamórficas y estratificadas. La actividad minera presente destaca la extracción de minerales como cobre, molibdeno, oro y plata como recursos metálicos en la mayor parte de la producción de la región pero también la presencia de rocas y minerales industriales (RMI) es relevante para la zona.

VII Región: Maule

La geografía de la zona se extiende desde los paralelos 34°41' y en los 36°33' de latitud sur, la región presenta diversas características geológicas en las formaciones rocosas de la que se incluyen rocas volcánicas, granitos, depósitos sedimentarios, pizarras y rocas metamórficas. La minería en la zona tiene un protagonismo también relevante donde se extraen minerales metálicos como el hierro oro y cobre, los recursos no metálicos extraídos son calizas y yeso.

5.1.4 Zona Sur

La extensión comprende desde el río Bio-Bio y termina en las cercanías del seno de Reloncaví, la zona sur se encuentra la parte meridional del país en donde la Cordillera de la Costa va descendiendo conforme más se va avanzando hacia el sur. Por su parte la geología en general de la zona se encuentra caracterizada por rocas metamórficas intrusivas con una erosión hídrica considerable y humedales que poseen un alto valor ecológico. Si bien la económica no está representada por la parte minera, a pesar de que si hay evidencia de que se puedan hallar yacimientos mineros para ser explotados, a día de hoy no se ha logrado poder llevar a cabo ningún proyecto

a gran escala pero esto no quiere decir que la actividad minera no existe, ya que existieron en el pasado medianas o pequeñas mineras que en la actualidad pocas que siguen operación en las que se extraen minerales energéticos como carbón principalmente, gas natural y petróleo, en cuanto a minería metálica se destacan minerales como el zinc y plomo.



Figura 17. SIG de las franjas metalogénicas y principales yacimientos, Modificado (Chile Polimetálico, 2020)

XVI Región: Ñuble

Una región nueva en comparación con las demás que desde el 2017 fue declarada la región número 16 del territorio chileno, se encuentra en la zona centro-sur entre los paralelos 36°00' y los 37°12' de latitud sur. En relación con sus características geológicas podemos distinguir rocas volcánicas, granitos, depósitos sedimentarios y rocas intrusivas. La región no cuenta con ninguna minera en la actualidad por lo que la extracción de algún recurso metálico no se realiza o ya que no hay registro de ello.

VIII Región: Bio-Bio

La región es localizada en límite sur de la zona central entre los paralelos 36°26' y los 38°29' de latitud sur, es considerada una de las regiones más importantes debido a que se concentran algunas de las principales actividades económicas con una gran relevancia para el país. Dentro de su geología podemos encontrar rocas volcánicas, depósitos sedimentarios, granitos y gneises. Los minerales que se encuentran son tipo energético como el carbón, aunque se están realizando búsquedas para hallar nuevos recursos mineralógicos de los que se incluyen cobre, molibdeno, carbón bituminoso y tierras raras.

IX Región: Araucanía

Su extensión va desde los paralelos 37°35' y de los 39°37' de latitud sur y desde los meridianos 70°50' de longitud oeste hasta el Océano Pacífico. Por la parte geológica dentro de la región nos encontramos con rocas en su mayoría volcánicas y rocas sedimentarias en lugares donde ha ocurrido erosión, pero también se encuentran menor cantidad rocas ígneas, granitos y rocas metamórficas. La región no cuenta con extracción de minerales metálicos en la actualidad.

X Región: Los Lagos

La región está ubicada en entre los paralelos 40°15' y los 44°14' de latitud sur, y se encuentra dividida en dos partes, la primera es Puerto Montt ubicado al norte de la región y la otra mitad la parte sur está constituida por islas y canales. Su geología está constituida por rocas volcánicas, sedimentarias y metamórficas, como también se encuentran granitos, mármol y arcillas. Los recursos minerales que podríamos encontrar son los energéticos como el carbón los minerales metálicos y no metálicos no son comúnmente relevantes para la región.

XIV Región: Los ríos

Su ubicación geográfica esta entre los paralelos 39°15' y los 40°33' de latitud sur, la influencia que tiene por la Cordillera de la Costa y por la Cordillera de los Andes ha desarrollado una geología que incluye rocas volcánicas, depósitos sedimentarios y granitos. La actividad minera en la zona no se encuentra desarrollada en comparación con las otras regiones de territorio pero se pueden hallar minerales energéticos como el carbón, los minerales metálicos y no metálicos no son comúnmente relevantes para la región al igual que en la región de los Lagos.

5.1.5 Zona Austral

Es la última zona de las 5 zonas del territorio chileno, y su extensión vas desde el golfo de Corcovado, al sur de la Isla grande de Chiloé hasta el territorio Antártico Chileno, la zona austral o conocida también como la Patagonia chilena alberga en su mayoría un territorio cubierto por grandes extensiones de hielo y bajas temperaturas. Sus características geológicas están dadas por el desplazamiento de los glaciares y por la acción del viento que han formado parte de la superficie del terreno, también posee una geología única por su ubicación en la Patagonia chilena y por su proximidad a la Antártica, en donde se destacan los campos hielo patagónico y por sus glaciares y fiordos. La actividad minera en la zona se encuentra en ciertas áreas, pero contiene depósitos mineralógicos y de recursos energéticos importante, como oro y carbón.

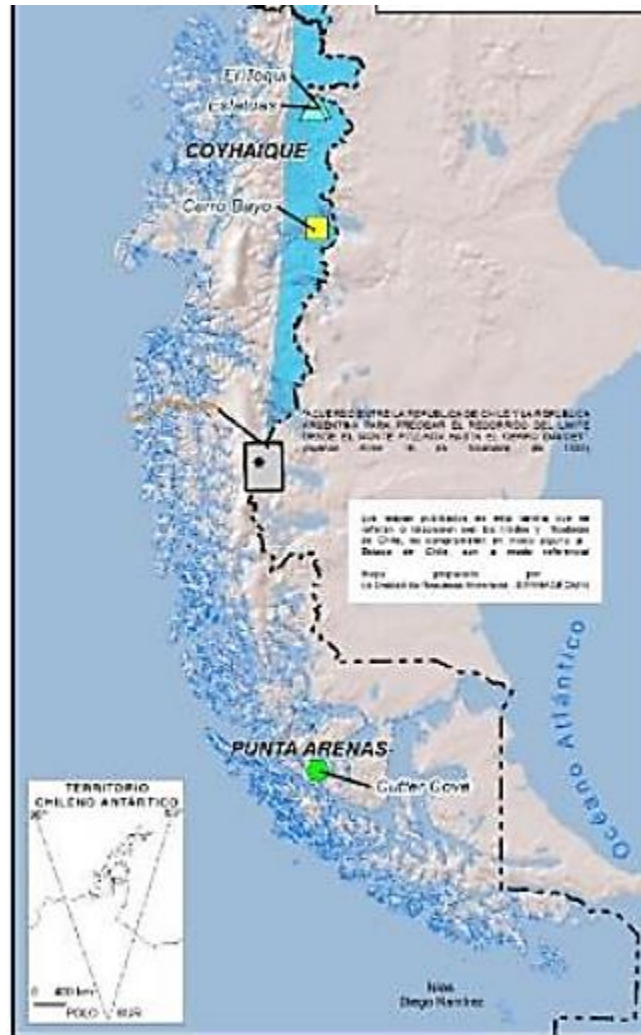


Figura 18. SIG de las franjas metalogénicas y principales yacimientos, Modificado (Chile Polimetálico, 2020)

XI Región: Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo

Su ubicación esta entre los paralelos $43^{\circ}38'$ por el norte, $49^{\circ}16'$ por el sur y de los $73^{\circ}06'$ al oeste de las aguas territoriales del Océano Pacífico, la geología incluye procesos de sedimentación y volcanismo a lo largo del tiempo, y se incluyen rocas sedimentarias y rocas volcánicas. La configuración de su relieve es bastante particular ya que hay ausencia de un valle longitudinal en cual se cambia por una cantidad considerable de canales marítimos y fiordos. La minería también un papel fundamental en la región donde se extraen minerales metálicos como oro, plata y zinc, en cuanto a la

minería no metálica, esta no se ha desarrollado tanto pero existen exploraciones de calizas y granitos.

XII Región: Magallanes y de la Antártica Chilena

Localizada en el extremo sur del territorio chileno, su sector sudamericano se ubica en la parte sudoccidental del continente entre los 48°36' a los 56°30' de latitud sur y entre los meridianos 66°25' y 75°40' de longitud oeste, es la región más extensa debido a que abarca parte del territorio Sudamericano y Antártico. La geología se caracterizado por rocas sedimentarias, un conjunto de rocas graníticas de dos tipos, rocas ígneas de origen magmático y metamórfico, también se pueden encontrar rocas metamórficas. Dentro de los minerales de la región podemos destacar tanto recursos energéticos como petróleo, gas natural y carbón, y en cuanto a minería metálica destaca la extracción de oro.



Figura 19. Leyenda de las figuras 14-15-16-17-18, Modificado (Chile Polimetálico, 2020)

Si hablamos con respecto a las proyecciones a futuro, el desarrollo geológico seguirá siendo parte clave en los próximos años para la economía en donde se espera la que demanda por recursos naturales aumente, lo que impulsará que la actividad geológica y minera. Asimismo la necesidad de mitigar los impactos medioambientales en conjunto con su compromiso con la sostenibilidad ambiental seguirá siendo prioridad para el gobierno y para la sociedad civil. Por ello antes de la perforación y tronadura, es esencial entender la geología del sitio. Esto determinará de manera más exacta las estrategias y técnicas que deberán emplear para optimizar de mejor manera estos procesos que son de suma importancia en cualquier empresa minera.

5.2 Diseño de Malla de Perforación

Un diseño adecuado y conforme es a lo que se refiere el patrón en el cual se realizaran las perforaciones y juega un rol transcendental en donde el diseño es crucial para asegurar una tronadura efectiva y segura en cuanto a operaciones, y que por su económica sea viable. La determinación adecuada de la malla va desde los puntos exactos en donde se deberán realizar las perforaciones hasta el control en cada momento con respecto a la seguridad y rendimiento. Una selección correcta de la malla de perforación se determina a través de ciertos para parámetros que serán claves para efectuar una perforación eficiente, dentro de los parámetros a considerar tenemos principalmente el objetivo de la perforación la que dependerá si se están realizando exploraciones para la búsqueda de nuevos recursos, si se desea extraer minerales o si se requiere obtener muestras del subsuelo para conocer y determinar sus características geomecánicas y geológicas mediante estudios posteriores. La geología del yacimiento es otro parámetro que se tiene que tomar en cuenta ya que conocer las características del terreno como la dureza, fracturaciones posibles, presencia de agua y la composición del mineral serán esenciales para determinar el patrón de la perforación. Por otra parte el tipo, disponibilidad y equipamiento de la

maquinaria que se encuentre a disposición para realizar el diseño será fundamental para la envergadura y profundidad de la perforación. El último parámetro a considerar son los costos y el presupuesto para llevar a cabo el diseño en la operación, costos como la flota de equipos de perforación y sus respectivas mantenciones, combustible y coste total que implica realizar la malla, entre otros. Cada parámetro mencionado anteriormente será de suma relevancia si este se lleva a cabo en minería a cielo abierto o en minería subterránea ya que ambos poseen diseños de malla completamente diferentes.

Un diseño óptimo de malla de perforación es esencial y tiene diversas ventajas como extracciones eficientes de los recursos minerales de los que se dispongan, menos perforaciones innecesarias que generan retrasos operacionales, reducciones en los costos y menores impactos medioambientales. Asimismo un buen diseño ayuda a prevenir accidentes que pueden terminar en derrumbes o inestabilidades en la mina, por lo tanto el diseño deberá garantizar la seguridad de los trabajadores y evitar pérdidas económicas. Algunas recomendaciones para optimizar su diseño son:

- Utilizar software capacitados para que logren simular los diferentes diseños de mallas y permitan prever los resultados, este recurso tecnológico debe aprovecharse al máximo ya que puede mejorar considerablemente la precisión del diseño.
- Realizar revisiones periódicas ya que a medida que la perforación va avanzando las condiciones del terreno pueden ir cambiando, por lo que una revisión y ajuste del diseño basándose en los resultados obtenidos será de suma importancia.
- Realizar capacitaciones constantes para que los trabajadores conozcan y tengan conocimiento de estas nuevas técnicas para que el equipo de trabajo se encuentre debidamente formado y capacitado para el uso de estas nuevas tecnologías.

- Un buen diseño debe tener en consideración los impactos ambientales ya que si bien la eficiencia de extracción es importante, también lo es minimizar el impacto que se genera en el entorno

5.3 Cálculo de Carga

El cálculo o factor de carga es la cantidad necesaria que se utiliza para poder fragmentar un metro cubico de roca, este está basado en la geología del lugar y en el diseño de perforación estos son dos puntos de suma relevancia para poder determinar la cantidad y tipo de explosivo pero también se debe tener en cuenta otros factores que ayudaran de manera complementaria a determinar los parámetros anteriores.

Los factores son los siguientes:

El objetivo de la tronadura tiene diferentes propósitos que según el tipo de explosivo que se seleccionara, esto quiere decir que si el propósito es fragmentar una cantera, se deberán utilizar de explosivos de alta potencia. Pero por el contrario si el objetivo principal de excavar y fragmentar en minería subterránea se tendrá que utilizar explosivos controlados.

El tipo de roca nos da a conocer las características geológicas de esta y que juegan un papel fundamental al momento de seleccionar el tipo de explosivo ya que ciertos explosivos son más efectivos con rocas duras, mientras que otros son más adecuados cuando se utilizan en rocas más blandas. Una vez teniendo claro esto se deberán analizar también la resistencia a la compresión, la densidad de la roca y la presencia de facturas para que al final la selección del tipo de explosivo sea la adecuada.

La seguridad es un factor crucial al momento de seleccionar el tipo y la cantidad de explosivo, por ello se tienen que seguir las regulaciones, procedimientos y practicas establecidas para así poder garantizar la seguridad e integridad de los trabajadores con principal objetivo pero también

para disminuir los riesgos tanto operacionales como medioambientales asociados a la tronadura.

Las restricciones medioambientales es otro punto por destacar ya que estas controlan el límite permitido de la cantidad y tipo de explosivo por utilizar, estas restricciones son mayores si en las cercanías hay áreas urbanas o comunidades locales por lo tanto se tienen cumplir con las leyes, normativas y regulaciones establecidas para garantizar un manejo seguro y responsables de los explosivos y para poder minimizar los potenciales impactos medioambientales. A su vez antes de realizar cualquier actividad relacionadas con la detonación en las operaciones mineras se debe realizar una evaluación de impacto ambiental (EIA) para detectar los posibles riesgos ambientales y sociales para así proponer medidas de mitigación ante cualquier eventualidad. Por último una buena gestión y planificación del diseño de tronadura tendrá un efecto positivo en cuanto a reducción de emisiones, a un manejo adecuado de los residuos, a una buena gestión de las aguas residuales y un buen control de ruido y vibraciones.

6. Seguridad y Medio Ambiente

6.1 Seguridad Ambiental

La seguridad ambiental tiene como principal objetivo proveer de técnicas, protocolos e instrumentos para evaluar, controlar y mitigar el nivel de amenazas potencialmente altas en el ecosistema que pongan en riesgo y vulnerabilidad de perder los bienes y los servicios que el planeta ofrece a sus habitantes y especies involucradas. En cuanto a minería podemos decir que es una de las industrias con mayor relevancia para el país y en donde la regulación ambiental ha condicionado en gran medida su desarrollo por ello los estándares han ido en aumento en cuanto a su evaluación ambiental, incluyendo sus posteriores operaciones y eventual cierre, para así intentar cuidar de la mejor el medio que nos rodea, garantizando un futuro próspero en donde no se comprometan las futuras generaciones.

En este mismo ámbito minero podemos mencionar la gestión ambiental, aquí la entendida encargada de realizar sus debidas inspecciones es el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), la entidad posee atribuciones directas en cuanto a los recursos mineros y naturales del país, esta tiene una participación de las evaluaciones de impacto ambiental de los proyectos mineros y no mineros que ingresan al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA).

Dentro de Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) se puede generar las siguientes evaluaciones:

- Estudio de Impacto Ambiental (EIA).
- Declaración de Impacto Ambiental (DIA).
- Informe Consolidado de Evaluación de EIA (ICE).

“Se considera como Proyecto Minero todo aquél que comprende una o más actividades propias de la Industria Extractiva Minera, y como Proyecto No Minero todo aquel que no comprende ninguna de las actividades de la Industria Extractiva Minera, pero que tienen componentes geológicos relevantes, en cuyo caso la competencia del SERNAGEOMIN se enmarca a los aspectos de índole geológica (Riesgos naturales y aspectos geológicos)” (SERNAGEOMIN, s.f.).

Algunos de los documentos legales que forman parte de la normativa legal asociada a la evaluación ambiental son:

- Ley 20.417: Crea el ministerio, el Servicio de Evaluación Ambiental y la superintendencia del Medio Ambiente.
- Ley 19.300: Ley Sobre Bases Generales del Medio Ambiente
- Decreto Supremo 40: Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental.

Por el lado de perforación y tronadura tenemos también protocolos y prácticas de seguridad ambiental propias de cada operación unitaria, entre las más destacadas y de las que se hablan en el presente trabajo tenemos:

6.2 Monitoreo de Vibraciones

Durante las tronaduras, las vibraciones generadas deben ser monitoreadas para garantizar tanto la seguridad de las personas así como también la integridad de la estructural de las áreas cercanas para así poder minimizar el impacto ambiental, cumpliendo con las regulaciones ambientales establecidas. Es importante mencionar que el daño producido es por las ondas de comprensión aérea en donde las vibraciones son las que pueden llegar a producir esfuerzos internos sobre las estructuras cercanas, el daño provocado por las vibraciones está relacionado directamente con la velocidad de vibración de partícula siendo este uno de los parámetros más representativos, el cual es medido y comparado con los estándares

internacionales para poder analizar y determinar si se están alcanzado los niveles críticos de vibraciones que son los responsables de generar daños perjudiciales a las estructuras. El instrumento que se utiliza para poder obtener estas mediciones son los geófonos, cuya función es medir las vibraciones máximas las cuales son expresadas como la velocidad de partícula (PPV) y sus frecuencias para luego comparar y relacionar con los criterios internacionales daños establecidos.

Por otra parte el nivel de vibración producido depende de su comportamiento dinámico, en particular de la frecuencia natural de oscilación. Por ello cada método o programa debe tener consideración las velocidades de partículas y sus frecuencias respectivas de la onda vibratoria, otros factores que inciden en el daño de las estructuras son el tiempo de duración de la vibración, la resistencia de los materiales de las estructuras y las características geológicas propias del suelo.

En cuanto a la normativa legislativa chilena en el artículo 570 del Reglamento de Seguridad Minera, el cual esta referido a las tronaduras y vibraciones que afectan a estructuras, edificios, poblados cercanos y construcciones establece los siguiente:

“Toda vez que los efectos de una tronadura en términos de vibraciones, transmisión de ondas aéreas o ruidos de impacto medidos y fundados en parámetros técnicos, puedan eventualmente afectar a instalaciones, estructuras, construcciones o poblados cercanos; la Administración de la empresa deberá adoptar las medidas de control pertinentes a objeto de minimizar dichos efectos.

Cuando las tronaduras se realicen en lugares próximos a edificios, propiedades o instalaciones, éstos deberán utilizar implementos protectores que eviten que las proyecciones, producto de la tronadura, los afecten.” (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2019).

6.3 Manejo de Detritos, Polvo en suspensión y Sustancias peligrosas

Los sistemas de supresión de polvo y la gestión de escombros son esenciales para minimizar el impacto ambiental y garantizar la salud y seguridad de los trabajadores. El manejo de detritos en la industria minera es una parte esencial dentro de las operaciones involucradas, los detritos pueden ser de diferentes tipos, de los que incluyen desechos sólidos, desechos de rocas o estéril y de otros materiales no deseados, estos deben ser debidamente gestionados para así disminuir en gran medida su impacto y a su vez también cumplir con las regulaciones gubernamentales. Un aspecto por destacar cuando hablamos del manejo de los detritos es comprender las características y la composición ya que será fundamental para tener una adecuada gestión, entre ellos se incluyen la identificación de posibles contaminantes y clasificación de los detritos según su naturaleza. Si los detritos contienen sustancias químicas peligrosas como productos químicos o metales pesados, deberán ser tratados y almacenados de manera segura de acuerdo con las regulaciones ambientales, donde la seguridad sea prioridad en todo momento cuando se realicen estos tipos de control de residuos. Otra consideración que debe tener es la posibilidad de que los detritos puedan ser reciclados en otras operaciones dentro de la industria minera o en proyectos a futuro con respecto a recuperación de las tierras, pero si los detritos no pueden ser reutilizados tendrá que ser eliminados de manera segura y adecuada. Esto puede incluir su debido almacenamiento en vertederos o su disposición en áreas controladas.

Con relación al polvo en suspensión podemos entenderlo como un conjunto de partículas pequeñas que pueden mantenerse en suspensión en el aire por un tiempo prolongado y que su rango se encuentra entre 1-100 micrones de diámetro, en minería los rangos permitidos del tamaño de las partículas van desde los 0.5 a 40 micrones. Al ser un material tan fino y que dependiendo de factores como su tamaño, composición y concentración, pueden causar un daño notorio en la salud de los trabajadores en donde según la

composición tiene gran relevancia ya que ciertas partículas producen efectos nocivos, dentro de ellos se destacan asbestos que producen asbestosis, la sílice que provoca la silicosis y por parte de los metales pesados los cuales provocan enfermedades de como el saturnismo y el hidrargirismo.

Dentro de las propiedades más importantes del polvo en minería es la distribución granulométrica ya que el tamaño de la partícula determinara el tiempo en el que estas se encontraran en suspensión en aire y como al final se disiparía. Sin embargo existen otras propiedades que inciden las cuales son las siguientes:

- Masa de polvo por unidad de volumen de aire.
- Tamaño de las partículas.
- Distribución de las partículas.
- Área superficial de las partículas por unidad de volumen.
- Composición química del polvo.

Otro aspecto importante que se deberá tener es la tasa de sedimentación de las partículas el cual está relacionado con la velocidad de aire de ventilación, ya que se ha comprobado que cuando las partículas caen libremente por un medio solido alcanzan velocidades constantes o conocido comúnmente como velocidad límite, en donde la resistencia que opone el medio sobre la partícula ocasiona un equilibrio con respecto a la atracción gravitacional ejercida sobre esta.

El movimiento de las partículas esféricas dentro de un medio viscoso como lo puede ser el aire o agua está regido bajo la ley Stokes y su relación es la siguiente:

$$V_t = D_s^2 g * \frac{(\rho_s - \rho_f)}{18\mu_f}$$

Donde:

V_t = velocidad límite de la partícula (m/s)

D_s = Diámetro de la partícula (m)

g = aceleración de gravedad (m/s^2)

ρ_s = densidad de la partícula (Kg/m^3)

ρ_f = densidad del fluido (Kg/m^3)

μ_f = viscosidad del fluido ($Kg/m.s.$)

Referente a los orígenes de donde puede provenir la emisión del polvo en suspensión puede ser muy variado y depende del tipo de operación que se esté realizando, entre ellas se incluyen las siguientes:

- Procesos de tronaduras tanto en minería subterránea como en el cielo abierto.
- Procesos de carguío de material
- Procesos de transporte de material
- Procesos de chancado y molienda.

6.4 Protocolos de Seguridad

Se deben establecer las pautas para la manipulación, transporte y almacenamiento seguro de explosivos, así como las medidas de evacuación y respuesta a emergencias, todo lo que sea debidamente necesario para prevenir accidentes, proteger la integridad y salud de los trabajadores, para así minimizar los riesgos asociados al entorno laboral.

Es fundamental que existan capacitaciones para que todos los trabajadores reciban y tengan de manera periódica capacitaciones de seguridad antes de

iniciar las actividades a realizar en el lugar de trabajo, esto es de vital importancia ya que ayudara de buena manera a la formación de las buenas prácticas de los procesamientos de seguridad para tener claro conocimientos e identificación de los riesgos y del uso adecuados de los elementos de protección personal.

Se debe también realizar una evaluación de los riesgos regularmente para identificar y evaluar los peligros presentes en el sector, o para posibles riesgos que puedan presentarse a futuro, todo con fin de tener un plan de contingencia antes estas eventualidades. Los planes de contingencia deben cumplir con un objetivo principal, el cual es prevenir y controlar eventos no planificados pero que si hayan sido previstos, por lo tanto un buen plan debe tener una buena e inmediata respuesta para poder atenuar los daños que han sido provocados y también deberá atender las emergencias de forma oportuna.

El plan de contingencia debe ser planificado, analizado y debe identificar las instalaciones y equipos críticos para poder evaluar su criticidad e impacto con el fin de establecer las medidas necesarias de control y/o acciones inmediatas a seguir.

Los elemento o secciones de un plan de contingencia se muestran en la siguiente imagen:



Figura 20. Elementos o secciones de un plan de contingencia (SERNAGEOMIN, 2020)

6.5 Impacto Ambiental

Los proyectos mineros cuentan con diferentes fases que van desde la exploración del yacimiento hasta el término de las operaciones y posterior con el periodo de cierre de la mina. Cada fase por la que pasa está asociada a un conglomerado de impactos ambientales que dejan efectos negativos en el medio ambiente.

Una vista general de donde proviene y que es lo que causan dichos impactos se mencionarán a continuación:

- Impacto de minería sobre el suelo

Producido por las pérdidas de los horizontes edáficos, cambios significativos en la morfología del lugar por la extracción de los minerales, pérdidas en la estabilidad de los taludes, desertificación y erosión.

- Impacto ambiental de minería atmosférico

Se produce por las emisiones de gases tóxicos o nocivos a la atmósfera, a su vez también la producción de polvo proveniente de la maquinaria, perforaciones, tronadura, carguío, transporte y acopio del material.

- Impacto de ruido y vibraciones

Proveniente de las excavaciones y de las labores de perforación y tronaduras.

- Impacto ambiental sobre las aguas

Las grandes cantidades de agua que utilizan las mineras para poder llevar a cabo sus procesos operacionales y productivos, cuya agua que después de ser utilizada ya es considerada como desecho es transportada a los relaves.

- Impacto ambiental sobre la flora y fauna

La minería al ocupar grandes extensiones de terreno para la extracción de los minerales provoca que haya una disminución de la flora y fauna propia del sector.

- Impacto ambiental sobre el valor paisajístico del lugar

Un impacto visual producido por las propias actividades mineras por su extracción y por sus depósitos en pilas o relaves de los desechos.

La industria minera, a través de sus múltiples etapas operacionales, ejerce un innegable impacto en el medio ambiente. Entre estas etapas, la perforación y tronadura son particularmente significativas debido a sus efectos directos e indirectos sobre el entorno. En el presente trabajo se explorarán los principales impactos ambientales derivados de la perforación y tronadura, en conjunto se propondrán algunas estrategias de mitigación.

6.5.1 Impactos Directos

Vibraciones: como se mencionó anteriormente la detonación de explosivos causa vibraciones que pueden afectar estructuras cercanas, causando daños

y, en ocasiones, desestabilización del terreno, lo que puede llevar a deslizamientos.

Ruido: Las detonaciones provenientes de la tronadura generan niveles significativos de ruido, lo que puede ser perjudicial para la fauna local y las comunidades cercanas.

Producción de Polvo: La tronadura y la posterior remoción de materiales liberan grandes cantidades de polvo al aire, esto afecta directamente en la calidad del aire y la salud de la fauna y la flora.

Alteración del Paisaje: Las zonas de extracción sufren cambios drásticos en su topografía, modificando los hábitats y los sectores ecológicos.

6.5.2 Impactos Indirectos

Calidad del Agua: Los residuos resultantes de la tronadura pueden ser arrastrados por las lluvias hacia fuentes hídricas, esto provoca una alteración en su composición lo que a su vez va afectando la flora y fauna acuáticas.

Disrupción de la Fauna: El ruido y las vibraciones pueden desplazar a animales de sus hábitats naturales, esto cambia los patrones migratorios y reproductivos.

Contaminación por Explosivos: Restos de explosivos no detonados que hayan sido retirados pueden filtrarse al subsuelo y contaminar las aguas subterráneas.

No obstante, las recientes tecnologías en la minería han demostrado una mayor habilidad para disminuir el impacto ambiental de las operaciones mineras, para ajustarse a los estándares de calidad de los principales parámetros.

6.5.3 Estrategias de Mitigación

Monitoreo: Es esencial establecer estaciones de monitoreo para controlar las vibraciones, el ruido y la calidad del aire. Estos datos nos permitirán ajustar las prácticas para minimizar el impacto.

Técnicas de Tronadura Controlada: Emplear técnicas que permitan una detonación más controlada y menos invasiva, como lo son las tronaduras secuenciales, estas pueden llegar a reducir los impactos de las vibraciones y ruidos.

Revegetación y Restauración: Una vez concluida la actividad minera, es crucial tener un plan de cierre minero para poder restaurar el área afectada, replantando vegetación y asegurando la estabilidad del suelo.

Manejo Adecuado de Residuos: Implementar protocolos para el tratamiento y disposición de detritos y residuos de tronadura, dichos protocolos serán fundamentales para reducir la contaminación del suelo y del agua.

Capacitación y Concienciación: Es de vital importancia que los trabajadores estén bien formados y concienciados sobre las buenas prácticas para minimizar los riesgos asociados al impacto ambiental y de seguridad para evitar accidentes.

7. Nuevas Tecnologías

Es cierto que a lo largo de la historia, se han explorado y propuesto varias alternativas para reemplazar los explosivos convencionales en la minería. Estos enfoques buscan formas más seguras, eficientes y sostenibles de extraer minerales sin los riesgos y desafíos asociados con la detonación de explosivos. A continuación se presenta una descripción más detallada de algunas de las alternativas seleccionadas:

7.1 Extracción por Láser

La extracción por láser es una tecnología que utiliza haces de luz láser de alta potencia para romper y fragmentar las rocas. La idea es dirigir haces láser hacia la superficie de la roca, lo que genera calor intenso y estrés térmico. Esto puede causar la fractura de la roca y la separación de fragmentos. Sin embargo, esta tecnología enfrenta desafíos técnicos y económicos, como la necesidad de un sistema láser potente y el manejo de las rocas fragmentadas. Los dispositivos láseres son elementos que han revolucionado gran parte de la industria, los campos científicos y tecnológicos desde su invención en 1960. En los años posteriores esta técnica ha dado grandes saltos tecnológicos y productivos debido a su capacidad de generar un haz de luz intenso, coherente, potente y altamente direccional, los convierte en herramientas de gran utilidad y con una amplia gama de aplicaciones.

Los principios básicos del funcionamiento de los láseres son mencionaran a continuación:

- Emisión Inducida: es el proceso mediante el cual un fotón estimula a otros fotones idénticos cuando entra en una frecuencia específica, dicha estimulación se produce cuando el fotón provoca la caída del electrón a un nivel inferior solo si este tiene una energía igual a la diferencia entre los dos niveles, dado esto se emitirá un segundo fotón idéntico que inducirá la transición.
- Amplificación óptica: es la ganancia de energía de los fotones cuando están en un proceso de excitación y de relajación de los átomos o de sus moléculas
- Realimentación óptica: la retroalimentación de la luz coherente emitida producida a través de un sistema de espejos o de elementos reflectantes generan una emisión estimulada constante.

Los láseres que se han desarrollado en la actualidad son de diferentes tipos y de composiciones variadas para sus respectivos usos y aplicaciones, entre los cuales tenemos los siguientes:

- Láseres semiconductores: los diodos laser son materiales semiconductores que pueden generar una luz coherente mediante la recombinación de concentraciones de electrones y huecos en una unión p-n.
- Láseres de fibra: son hilos de fibra óptica dopada con elementos como erbio o el iterbio que se utilizan para obtener una emisión laser.
- Láseres de estado sólido: utilizan un medio sólido como los cristales o vidrios para que se puede realizar la emisión laser
- Láseres de gas: gases como el helio-neón (He-Ne) o el dióxido de carbono (CO₂) son los empleados para poder generar la emisión laser.

La utilización de los láseres ha sido parte fundamental para llevar a cabo ciertos trabajos de manera precisa, por las grandes ventajas operacionales que tienen este tipo de tecnologías, de ellas se destacan:

- Precisión y calidad: los láseres han sido destacado por realizar operaciones tales como corte, soldadura y perforación con una precisión excepcional. La luz coherente emitida y su alta direccionalidad garantiza un control preciso a lo largo del proceso que se encuentre realizando, por lo que ofrece una alta calidad en el resultado final del proceso.
- Velocidad y productividad: las operaciones con la utilización de láseres resultan en ser más rápidas y eficientes ya que poseen una alta densidad en relación con la potencia y la capacidad de enfocar el haz del láser en un punto específico en el área, todo esto resulta en que permite una mayor velocidad en la producción.
- Flexibilidad y versatilidad: son herramientas altamente versátiles con la capacidad de adaptarse a una amplia gama de aplicaciones dentro de la industrial. La potencia, longitud de onda y el haz del láser se pueden ajustar para adaptarse a diferentes materiales y según los requisitos deseados del procedimiento.
- Minimización de residuos: los residuos generados son menores en cuanto a su método de procesamiento al momento de terminar. La precisión del láser hace que su uso sea eficiente en los materiales donde es aplicado lo que reduce los residuos significativamente, lograron una producción más sostenible y cuidadosa con el medio ambiente.
- Buen consumo energético: la eficiencia energética es mayor en los campos donde se utilizan los láseres, esto debido a que la energía del láser se concentra en un lugar del área específico, lo que reduce el desperdicio de energía empleada para así optimizar su consumo.

- Automatización y control: los sistemas láseres pueden integrarse de buena manera en las líneas de producción automatizadas, permitiendo un control preciso y consistente en todo momento. Esto se traduce en una mayor eficiencia y calidad del proceso, reduciendo en gran medida los posibles errores que puedan surgir.

Las ventajas económicas de implementar láseres en labores operacionales pueden tener un impacto positivo por las siguientes razones:

- Eficiencia en la perforación: al permitir la realización de una perforación más precisa y controlado puede resultar en menores tiempos operacionales, generando un aumento en la productividad y disminución de costos operativos.
- Reducción de residuos: la perforación con láser puede contribuir a una reducción de los desechos que producen en este tipo de labores, por ende los costos asociados a la gestión y manejo de residuos también sería menor.
- Eficiencia energética: la tecnología láser empleada en perforación podría ofrecer una mayor eficiencia de la energía que se necesite para mantener operativo el equipo, esto contribuye a que haya menores gastos asociados al consumo de energía
- Competitividad en el mercado: implementar estas nuevas tecnologías significaría que la empresa en cuestión mejore su posicionamiento en cuanto a las competencias del mercado, atrayendo a nuevos clientes o inversores que valoren la eficiencia y la sostenibilidad.

En el ámbito de la sostenibilidad ambiental los láseres también podrían aportar de buena manera si se implementan ya que ofrece ventajas como:

- Reducción de emisiones: este tipo de perforación ayudaría a reducir emisiones como el polvo generado durante el proceso, disminuyendo en gran medida las partículas finas en suspensión en el aire, lo que ayuda a mejorar la calidad de aire para las personas.
- Mejor gestión del uso de aguas: la disminución en cuanto a la generación de polvo y residuos puede implicar que mejore la gestión del agua, ya que menos generación de polvo implica menor uso de agua para su respectivo control, y la reducción de desechos puede mitigar la contaminación en el agua.
- Menor riesgo de erosión en el suelo: una gestión adecuada de las operaciones de perforación con tecnología láser podría reducir el riesgo de erosión del suelo, ya que se minimiza la alteración de no planificada de la topografía y cobertura vegetal.

Si bien los láseres han ido ocupando un lugar importante en la industrial a nivel mundial, y han sido aplicados en diferentes campos en donde han demostrado su efectividad y calidad. En esta ocasión se referirá a su capacidad de poder realizar la labor de perforación de materiales, principalmente en formaciones rocosas, antes de ellos se deberá entender dos conceptos claves los cuales son la ablación y perforación de los materiales mediante láseres.

La ablación con láser es un proceso en cual se utiliza un láser para eliminar o vaporizar selectivamente la capa superficial del material sin dañar su estructura subyacente, esta se emplea principalmente en aplicaciones en donde se requiere la eliminación precisa y controlada de un material. La ablación se logra mediante la generación de pulsos láseres de alta energía y

de corta duración. Cuando el láser incide en el material, la energía proveniente del láser es absorbida por la capa superficial del material, esto genera su vaporización o descomposición en forma de gas, el proceso logra eliminar capas delgadas del material con precisión y sin generar daños térmicos significativos en la estructura subyacente.

La perforación de materiales con láseres implica la realización de agujeros u orificios a través de un material utilizando un láser, el proceso de perforación es ampliamente utilizado para fabricar componentes que requieran orificios de tamaño y forma precisa. El proceso realizado es mediante un haz de luz de alta intensidad en un punto específico del material. La alta densidad de energía concentrada en el punto genera vaporización o fusión del material, lo que resulta en la creación de un orificio, su forma y tamaño se determinarán mediante la configuración que tenga el láser en conjunto con la potencia y duración del pulso.

Hay que tener en consideración que si la implementación de láseres en minería llegase a ser factible esta debe cumplir con los siguientes límites permisibles.

Tabla 1: Límites permisibles para exposiciones oculares directas por haz de láser.

Región de Espectro	Longitud de Onda (nm)	Tiempo de Exposición (t) (Segundos)	Límite Permissible
UVC	180 a 280	10^{-9} a 3×10^4	3 mJ/cm ²
UVB*	280 a 302	10^{-9} a 3×10^4	3 mJ/cm ²
	303	10^{-9} a 3×10^4	4 mJ/cm ²
	304	10^{-9} a 3×10^4	6 mJ/cm ²
	305	10^{-9} a 3×10^4	10 mJ/cm ²
	306	10^{-9} a 3×10^4	16 mJ/cm ²
	307	10^{-9} a 3×10^4	25 mJ/cm ²
	308	10^{-9} a 3×10^4	40 mJ/cm ²
	309	10^{-9} a 3×10^4	63 mJ/cm ²
	310	10^{-9} a 3×10^4	100 mJ/cm ²
	311	10^{-9} a 3×10^4	160 mJ/cm ²
	312	10^{-9} a 3×10^4	250 mJ/cm ²
	313	10^{-9} a 3×10^4	400 mJ/cm ²
	314	10^{-9} a 3×10^4	630 mJ/cm ²
UVA	315 a 400	10^{-9} a 10	$0,56 t^{1/4}$ J/cm ²
	315 a 400	10 a 10^3	1,0 J/cm ²
	315 a 400	10^3 a 3×10^4	1,0 mW/cm ²
Luz Visible	400 a 700	10^9 a $1,8 \times 10^5$	5×10^{-7} J/cm ²
	400 a 700	$1,8 \times 10^5$ a 10	$1,8 (t/t^{1/4})$ mJ/cm ²
	400 a 549	10 a 10^4	10 mJ/cm ²
	550 a 700	10 a T ₁	$1,8 (t/t^{1/4})$ mJ/cm ²
	500 a 700	T ₁ a 10^4	10 C _B mJ/cm ²
	400 a 700	10^4 a 3×10^4	C _B μW/cm ²
IR-A	700 a 1049	10^9 a $1,8 \times 10^5$	$5 C_A \times 10^{-7}$ J/cm ²
	700 a 1049	$1,8 \times 10^5$ a 10^3	$1,8 C_A (t/t^{1/4})$ mJ/cm ²
	1050 a 1400	10^9 a 10^4	5×10^{-6} J/cm ²
	1050 a 1400	10^4 a 10^3	9 (t/t ^{1/4}) mJ/cm ²
	700 a 1400	10^3 a 3×10^4	320 C _A μW/cm ²
IR-B y C	1,4 μm a 10^3 μm	10^{-9} a 10^{-7}	10^{-2} J/cm ²
	1,4 μm a 10^3 μm	10^{-7} a 10	$0,56 t^{1/4}$ J/cm ²
	1,4 μm a 10^3 μm	10 a 3×10^4	0,1 W/cm ²

UVB * El Límite Permissible no deberá exceder de $0,56 t^{1/4}$ (J/cm²) para t 10

$$CA = 10 (0,002 (\lambda - 700)), \text{ para } \lambda = 700 - 1049 \text{ nm}$$

$$CA = 5, \text{ para } \lambda = 1050 - 1400 \text{ nm}$$

$$CB = 1, \text{ para } \lambda = 400 - 549 \text{ nm}$$

$$CB = 10 (0,015 (\lambda - 550)), \text{ para } \lambda = 550 - 700 \text{ nm}$$

$$T1 = 10 \text{ seg.}, \text{ para } \lambda = 400 - 549 \text{ nm}$$

$$T1 = 10 \times 10 (0,02 (\lambda - 550)), \text{ para } \lambda = 550 - 700 \text{ nm}$$

CA y CB = Factores de Corrección

Fuente: IST, 2016

Tabla 2: Límites permisibles para la exposición de la piel a un haz laser.

Región del Espectro	Longitud De Onda (nm)	Tiempo de Exposición (Segundos)	Límite Permissible
UV	180 a 400	10^{-9} a 3×10^4	Igual que en tabla 1
Luz Visible y IR-A	400 a 1400 400 a 1400 400 a 1400	10^{-9} a 10^{-7} 10^{-7} a 10 0 a 3×10^4	$2 C_A \times 10^{-2} \text{ J/cm}^2$ $1,1 C_A t^{1/4} \text{ J/cm}^2$ $0,2 C_A \text{ W/cm}^2$
IR-B y C	$1,4 \mu\text{m}$ a $10^3 \mu\text{m}$	10^{-9} a 3×10^4	Igual que en Tabla 1

$CA=1$, para $\lambda = 400 - 700 \text{ nm}$

$CA=10^{(0,002(\lambda-700))}$, para $\lambda = 700 - 1049 \text{ nm}$

$CA=5$, para $\lambda = 1050 - 1400 \text{ nm}$

Fuente: IST, 2016

7.2 Sandvik i-Sure

“El software iSURE (Intelligent Sandvik Underground Rock Excavation) es un programa informático de renombre mundial para la construcción de túneles y el control de procesos de perforación y voladura en minería. Ayuda a producir los datos necesarios para optimizar el ciclo de perforación y voladura, capitalizando la precisión de los equipos avanzados de la serie i de Sandvik, que están diseñados para usarse de acuerdo con las necesidades específicas y diversas del usuario y la aplicación específica de manera eficiente” (MCH, 2021)

Este software es útil para diseñar el plan de perforación que después se transfiere a los equipos mediante un USB. Para los equipos antiguos se traduce al antiguo formato TCAD, anterior paquete de software incorporado de Sandvik, que ofrece una emisión de informes más sofisticado tanto para la perforación como para los parámetros del equipo, incluyendo, datos de medición durante la perforación, forma del frente en 3D, consumo de varillaje, eficiencia y muchos otros. Es un software para la excavación de roca subterránea del control de procesos de la propia excavación, ha sido desarrollado en específico para proporcionar a los equipos perforación frontal la información necesaria para así optimizar la perforación y posterior voladura de la roca.

7.2.1 Herramientas y funciones

El programa cuenta con herramientas que desarrollan y generan los planes de perforación y voladura, lo que se basan en plantillas que consideran la capacidad de voladura de la roca, el perfil de calidad deseado para el túnel y los explosivos utilizados. Esto también incluye la capacidad del diseñador para editar y ajustar fácilmente el resultado según la retroalimentación de la perforación y el proceso de voladura. Se prioriza el diseño de voladuras en la parte inferior de la ronda, ya que es el punto más crítico para la voladura.

Cuenta con contadores con referencia a la capacidad de producción de la perforadora en cuestión, nos entrega datos de la malla de perforación realizada en comparación a la que se tenía en el plan y si esta se realiza de manera correcta, también nos entrega datos como la forma realizada de la ronda anterior, la medición durante la perforación (MWD), la extracción de voladuras, el perfil del túnel escaneado y la interpretación geológica están disponibles, lo que proporciona información valiosa para ajustar el comportamiento del equipo y actúa como una herramienta de aprendizaje para los operadores.

Además cuenta una herramienta que permite hacer ediciones de forma rápida y sencilla de los planes de los que ya se encuentren diseñados, cuenta también con una base de datos de los datos de perforación y voladura, por último se puede importar la información de planes anteriores para poder utilizarlo en nuevos diseños.

El Software incluye los siguientes 4 Módulos:

iSURE Túnel: Diseño de la perforación y voladura, en donde se encuentran aspectos como el esquema de la perforación, los tiros largos, la línea de túnel y los ficheros del proyecto.

iSURE Informe: Los datos anteriores más la emisión de los informes necesarios para la gestión y desarrollo del proyecto solicitado.

iSURE Analisis: Todos los datos mencionados anteriormente sumado la recopilación de los datos que emiten durante el proceso de perforación para realizar un posterior análisis de las características del macizo rocoso

iSURE Bulonaje: Cuanta con el diseño de hasta 5 filas de bulonaje, dentro de esto se incluye datos como la ubicación de los barrenos y su dirección, y herramientas para la generación de los barrenos y bulones.

7.2.2 Analisis MWD

El módulo de análisis iSURE tiene como función principal la recopilación datos y el análisis de informes durante la perforación con respecto a las propiedades y estructura de las rocas. Recoger la información en los siguientes 13 parámetros:

1. Antiatranque.
2. Disposición.
3. Control perforación.
4. Presión de avance.
5. Flujo barrido.

6. Presión de barrido.
7. Ratio penetración.
8. Presión de percusión.
9. Detección de roca.
10. Presión de rotación.
11. Velocidad de rotación.
12. Presión estabilizadora.
13. Estado del flujo de barrido y presión de la bomba de agua.

Las ventajas con las que cuenta la implementación del software se detallaran a continuación:

- Permite maximizar, evaluar y hacer mediciones sobre el uso de la plataforma de perforación, haciendo que este proceso ronda por ronda sea más eficiente
- Con respecto al bulonaje tiene la capacidad de emitir informes en donde compare la ubicación planificada y la real.
- Permite visualizar el equipo (JUMBO) en la pantalla de su oficina para así tener seguimiento de este y para poder detectar posibles desviaciones.
- Precisión Optima.
- Fácil manejo.
- Reducción de las vibraciones.
- Planificación rápida.
- Acceso remoto.

Actualmente el software se encuentra en su versión iSURE 8.1 posee un arsenal de herramientas diseñadas para abordar de manera especial las "métricas avanzadas". Esto permite a los usuarios incrementar su comprensión y descubrir áreas de mejora en el uso de equipos de perforación frontal y en el proceso de perforación y voladura de excavación de túneles,

generando KPI de alto nivel a partir de las rondas recopiladas y los datos de diseño correspondientes.

iSURE 8.1 presenta características nuevas y existentes diseñadas para optimizar el proceso de perforación y voladura mediante la recopilación de datos.

Dentro de las nuevas ventajas de esta nueva versión tenemos:

Su principal objetivo es potenciar la eficiencia en la producción de excavación mediante la perforación frontal, anticipar y organizar futuras iniciativas como nuevos proyectos, y generar conciencia en situaciones problemáticas o desafiantes. Las métricas han sido especialmente diseñadas para su aplicación en entornos de minería y túneles.

Además, señalará la necesidad de ajustes en la perforadora o la posibilidad de un uso indebido de la misma. Exhibe las variaciones en la eficacia de perforación del macizo rocoso, el consumo de acero para perforación, la forma de cara posterior a la voladura y el escalamiento, cualquier desviación del plan por parte del operador durante la perforación, y a partir de los datos del escáner, presenta el perfil ejecutado y el volumen de producción.

Por último es importante destacar que iSURE 8.1 no es la versión de desarrollo final de esta solución líder de Sandvik. Se planean más mejoras y desarrollos basados en el intercambio continuo de conocimientos y experiencias con clientes y expertos en perforación y voladura de todo el mundo. Actualmente, iSURE se utiliza con equipos de perforación frontal Sandvik i-Series, i-Series de diseño original y i-Series más nuevos, herramientas TCAD y herramientas de empernado.

7.3 Tecnología de Georradar

Aparte de entender lo que está por encima del suelo, también es importante saber lo que yace debajo de él. Para este propósito, se utiliza el radar de penetración de tierra, ya que proporciona información sobre el subsuelo de la tierra.

El radar penetrante en tierra es un método geofísico que utiliza pulsos de radar para la imagen del subsuelo. Este método no destructivo utiliza la radiación electromagnética en la banda de microondas del espectro radioelétrico y detecta las señales reflejadas de las estructuras del subsuelo.

Los georadares son instrumentos que se fundamentan en la emisión y difusión de señales electromagnéticas. En cuanto al contexto en minería son útiles para tener establecidos los límites de las formaciones anómalas de los minerales que hayan formados en la zona.

El instrumento como tal es conocido como GPR en sus siglas en inglés que significan Ground Penetration Radar, es un dispositivo prospección que emite y propaga señales electromagnéticas. La manera en la que funciona este dispositivo es mediante un emisor que origina una secuencia de pulsos (señales electromagnéticas) emitidas desde una antena en la superficie que al penetrar los estratos del suelo provocan una reflexión de una proporción de energía de la onda incidente, por otra parte la antena receptora se encarga de identificar las señales devueltas para luego realizar y producir una recopilación o reproducción visual bidimensional de “profundidad-distancia” del suelo, para obtener estos resultados previamente se debe realizar una trayectoria de desplazamiento de la zona que se requiera ser estudiada.

7.3.1 Funcionamiento de un GPR

El funcionamiento del GPR se puede interpretar como el tiempo de medición en que tardan las ondas electromagnéticas en viajar desde la antena emisora hasta una capa o estructura del subsuelo y de regreso a la antena receptora.

La recopilación de la información se muestra instantáneamente en forma de secciones transversales o cortes, lo que permite a los profesionales encargados obtener una comprensión de las diversas capas, objetos que se encuentren en el subsuelo y detectar cambios en las propiedades de los materiales, así como también permite la detección de grietas y huecos. Los georadares por lo general utilizan las ondas de radio de alta frecuencia, las cuales se encuentran polarizadas en el rango de 10 MHz a 2,6 GHz.

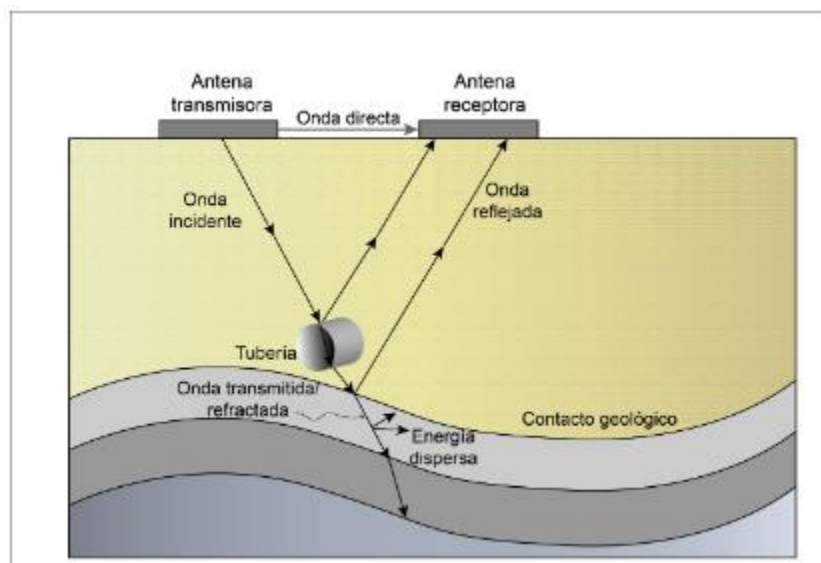


Figura 21. Esquema de funcionamiento de un georadar (OER commons, 2019)

Dentro de sus ventajas principales tenemos:

- Es uno de los métodos con mayor velocidad de revelamiento con mayor densidad y cantidad de información
- Las imágenes del subsuelo generadas en el radar tienen una alta resolución y procesa grandes cantidades de información en poco tiempo.

Otras ventajas por destacar de los georadares son las siguientes:

- Los georadares son técnicas no destructivas que no dañan la superficie estudiada, esto es debido a que no existe la necesidad de realizar

excavaciones para obtener la información (características, propiedades, etc.) sobre lo que se encuentra por debajo de la superficie. Esto también se puede traducir en una disminución de los costos por perforación o excavaciones innecesarias.

- Es una técnica rápida que entrega la información en tiempo real lo que facilita a los profesionales realizar una toma de decisión acorde de manera precisa a lo que se esté analizando debido que la información obtenida del subsuelo es de suma importancia para realizar en este caso las labores de perforación, esto ayuda a su vez también a tener un aumento y eficiencia en la productividad.
- Con respecto a la seguridad, el georadar es una herramienta de fácil manejo y segura al momento de utilizarla, debido a que no emite radiaciones tanto a las personas como el medio ambiente.
- Son ampliamente versátiles ya que pueden ser utilizados en una amplia gama de proyectos y variedad de terrenos.
- Las imágenes entregadas por los georadares son de alta resolución, esto permite una mejora significativa con respecto a la visualización y análisis de toda la información recopilada del subsuelo.



Figura 22. Georadar X3M (Huella Minera, 2016)

7.3.2 Consideraciones al momento de utilizar georadares

Realizar una interpretación adecuada de los datos recopilados es clave para obtener buenos resultados en los GPR, para ello se necesita de experiencia y un conocimiento de las propiedades del suelo y del subsuelo, y de las características de las ondas electromagnéticas.

Corregir y calibrar de los datos del GPR es fundamental para así minimizar los efectos de atenuación y la dispersión de las ondas electromagnéticas, en este caso se debe tener en cuenta factores como la velocidad de propagación de las ondas a través del subsuelo, las condiciones del terreno y su respectiva rugosidad. Tener una precisión en la calibración garantiza una exactitud en los resultados y facilita una comparación consistente de las distintas mediciones obtenidas por el GPR.

Si bien los GPR son herramientas con una utilidad y funcionalidad enorme, presentan ciertos tipos de limitaciones como la capacidad de penetración en el suelo depende de la conductividad y permitividad, a su vez condiciones

adversas del terreno como la humedad, son factores que pueden incidir en que se obtengan resultados de menor calidad.

Tabla 3. Propiedades dieléctricas de los principales materiales encontrados en la naturaleza.

Material	Permitividad Dieléctrica (F/m)	Conductividad (Ohm.m-1)	Longitud de Onda (cm)	Atenuación (1/m)	Velocidad		
					(m/μs)	(m/ns)	(cm/ns)
Aire	1	0	75	0	300	0,3	30
Agua (Salada)	81	4	6,36	63,91	25,4	0,0254	2,54
Agua (Pura)	81	0,0001	8,33	0	33,3	0,0333	3,33
Asfalto	6	0,001	30,62	0,08	122,5	0,1225	12,25
Basalto	8	0,01	26,51	0,67	106	0,106	10,6
Caliza (Mojada)	12	0,1	21,29	5,35	85,2	0,0852	8,52
Concreto	7	0,0001	28,35	0,01	113,4	0,1134	11,34
Granito	5	1.00E-08	33,54	0	134,2	0,1342	13,42
Arenisca (Mojada)	6	0,04	30,29	3,04	121,1	0,1211	12,11
Arena (Seca)	9	0,001	25	0,06	100	0,1	10
Suelo Limoso (Seco)	2,5	0,00011	47,43	0,01	189,7	0,1897	18,97
Suelo Limoso (Mojado)	19	0,021	17,2	0,91	68,8	0,0688	6,88
Suelo Arenoso (Seco)	2,5	0,00014	47,43	0,02	189,7	0,1897	18,97
Suelo Arenoso (Mojado)	25	0,007	15	0,26	60	0,06	6
Suelo Arcilloso (Seco)	2,4	0,0003	48,41	0,04	193,6	0,1936	19,36
Suelo Arcilloso (Mojado)	15	0,05	19,31	2,43	77,2	0,0772	7,72

Fuente: OER commons, 2019.

La selección de las antenas es otra consideración importante ya que estas determinaran de manera precisa la profundidad y el objetivo propiamente tal de la investigación que se lleve a cabo. También las antenas determinar la resolución ya que depende de las frecuencias propias de estas.

Tabla 4: Tipos de antenas y su relación con la frecuencia, resolución, objetivo y profundidad.

Frecuencia (MHz)	Resolución	Profundidad (m)	Tipo de investigación
100	Media a baja	15-20	Campañas geológicas y geotécnicas
250	Intermedia	6-8	Detección de elementos enterrados
500	Media a alta	5-6	Detección de elementos enterrados, arqueología, vías
800	Alta	1-2	Campañas a detalle

Fuente: OER commons, 2019.

7.3.3 Importancia para Perforación y Tronadura

Si bien la tecnología georadar en minería es utilizada para la detección y delimitación de los cuerpos y vetas mineralizadas, también tiene relevancia para los procesos unitarios de perforación y tronadura ya que mediante el GPR se pueden detectar con alta precisión las estructuras en el subsuelo previo al inicio de estas labores lo que puede ayudar por ejemplo a prevenir un posible colapso. A su vez también en aplicaciones a grandes profundidades tiene gran relevancia, esta debido a que te ayuda a la identificación de las características geológicas de ciertas zonas con potencial ruptura de rocas, como familias de fracturas o fallas.

Ventajas para los procesos de perforación y tronadura

- El georadar permite caracterizar con gran precisión las capas subyacentes geológicas, tener conocimiento de esto es de gran ayuda para los equipos de perforación ya que se conoce de mejor manera la composición del subsuelo antes de llevar a cabo la labor.
- La información recopilada por el georadar ayuda a realizar planificación óptima de la selección de los sitios a perforar ya que se identifican de

mejor manera la ubicación de los recursos o estructuras geológicas de interés.

- Se pueden identificar obstáculos tales como rocas de alta dureza y fallas geológicas antes de la perforación, esto nos brinda evitar retrasos por obstrucciones imprevistas.
- En relación con lo anterior, hay una reducción riesgos debido a que es posible la identificación de estos posibles riesgos como lo pueden ser zonas de inestabilidad o cambios relevantes en la geología del sector, lo que contribuye a su vez a una disminución de los accidentes en las operaciones.
- Por el lado de tronadura, los georadares pueden identificar variaciones en la composición de las rocas, esto mejora la manera en que se distribuya el explosivo para tener una tronadura eficiente y controlada.

Tabla 5: Resumen de Ventajas y Desventajas del uso de los GPR.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Mayor profundidad de investigación - Buena penetración de las ondas electromagnéticas en materiales de baja conductividad (ej. arenas secas, calizas, concreto o granito) - Los datos pueden ser vistos en tiempo real - Posibilidad de trabajar también sobre concreto - Es un método no destructivo 	<ul style="list-style-type: none"> - Menor profundidad de investigación - Mayor atenuación en arenas arcillosas - No suele detectar los objetivos en suelos arcillosos (skin effect) con alto nivel freático y, o, salino - Toma mucho tiempo cubrir áreas extensas - El terreno debe ser plano, sin ondulaciones

Fuente: OER commons, 2019

Acerca de los costos asociados a la implementación este tipo de tecnología en minería podemos decir que es variada debido a que depende de una serie de factores, de los que se incluyen la marca y/o modelo y de las

características propias del georadar a utilizar. El precio asociado también depende de la calidad de la antena (emisora o receptora), tamaño tanto del equipo o de las antenas, la capacidad de la recopilación, procesamiento y resolución de datos, cada uno de estos aspectos tendrá un impacto directo al momento de hablar del costo del equipo.

Un punto clave a tener en consideración es que existen otros costos asociados a la implementación del equipo, costos que hacen referencia a herramientas complementarias, como lo sería el software para el procesamiento de los datos, también se incluyen accesorios extras como antenas o repuestos.



Figura 23. Georadar Leica DS2000 (Leica GeoSystem, s.f)

Por último se debe tener en consideración posibles capacitaciones para que el profesional encargado aproveche al máximo esta herramienta tan valiosa y versátil que gracias a su amplia gama de aplicaciones y ventajas entrega información precisa y resultados confiables del subsuelo.

7.4 Integración de Big Data y Analítica Avanzada

La recopilación y el análisis de grandes volúmenes de datos generados durante la perforación y tronadura pueden proporcionar información valiosa para optimizar los procesos, prever problemas y mejorar la productividad.

La capacidad de análisis del Big data es bastante eficiente ya que es capaz de procesar grandes cantidades de información que ayudan significativamente a mejorar los diferentes procesos unitarios en minería, desde los procesos de extracción hasta el transporte del mineral.

A su vez también el Big data permite tener mejoras con respecto al manejo operativo de los equipos o maquinaria utilizadas en los diferentes procesos, esto debido a que se instalan dispositivos (IoT) o sensores que permiten obtener los datos con respecto a su rendimiento, producción y funcionamiento, entre otros parámetros, todo esto con el fin de mejorar su uso y tener planificaciones preventivas de sus mantenciones. Esto también tiene un impacto positivo en que los costos operativos sean menores y que la vida útil de los equipos sea mayor.

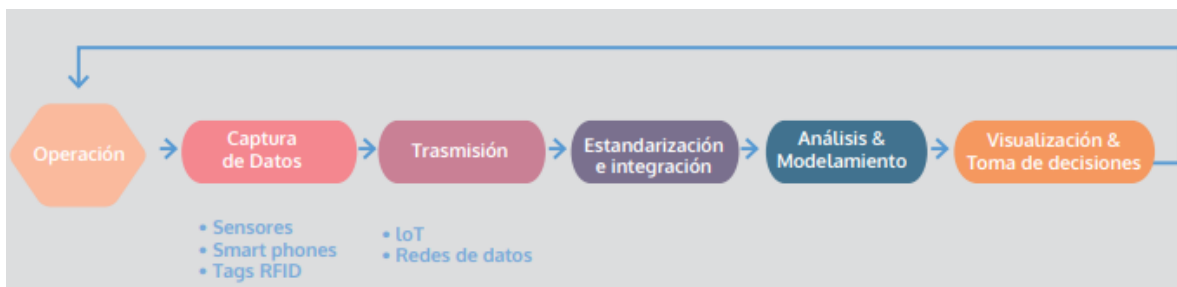


Figura 24. Modelo conceptual de la aplicación del Big Data en los procesos productivos en minería (Beauchef Minería, 2020)

El uso de analítica avanzada en conjunto con otras herramientas permite tener mejoras continuas en los procesos involucrados, ya que favorece la identificación de los parámetros de operación óptimos, en donde se definan

de los estándares operacionales para poder realizar una toma de decisión de forma correcta frente a cualquier problema o eventualidad.

7.4.1 Big Data y Analítica de avanzada en los procesos unitarios de Perforación y Tronadura.

El uso de Big data en perforación ayuda a tener un análisis de los datos geológicos ya que luego de analizar el conjunto de datos obtenidos se pueden identificar patrones y tendencias que permiten que haya una mejora en la toma de decisiones en la planificación de las perforaciones para que estas a su vez sean más efectiva. Con respecto a la geología, los datos recopilados ayudan conocer composición y estructura del yacimiento, lo que útil para tener una estimación de los recursos disponibles.

Como se mencionó anteriormente el Big data sirve para tener un registro de los datos en tiempo real ya que los equipos modernos cuentan con sensores que generan datos sobre la velocidad de perforación, temperatura, producción, entre otros parámetros. El análisis de este conglomerado de datos proporciona información de los rendimientos de los equipos de perforación y ayuda a identificar las posibles oportunidades de mejora.

Por su parte en los procesos de tronadura ayuda a tener un monitoreo en tiempo real en donde una vez recopilado los datos, la analítica avanzada se encarga de procesar estos datos para mejorar la configuración de la tronadura y minimizar el desperdicio de explosivos.

La analítica de esta gran base de datos puede utilizarse para analizar las vibraciones resultantes en las tronaduras para perfeccionar la distribución de la carga explosiva para reducir las vibraciones producidas y su respectivo impacto ambiental.

Otro aspecto fundamental es la mejora en la distribución de la carga explosiva ya que los datos recopilados sobre la carga explosiva y secuencia de detonación pueden ser analizados para maximizar la fragmentación de la roca y minimizar la cantidad de explosivo a utilizar.

La implementación de esta tecnología ayuda a tener una eficiencia operativa, en el que la analítica avanzada puede optimizar la planificación logística e identificando las áreas de mejoras continuas.

Un punto importante que destacar es también que análisis de los datos puede ser útil ya que con respecto a los mantenimientos predictivos, esto es debido a la monitorización continua del estado de vida útil de los equipos de perforación y tronadura, esto ayuda prever fallos y reduciendo el tiempo de inactividad no planificado, con el fin de planificar el mantenimiento de forma proactiva.

Las ventajas de implementar el Big Data y analítica avanzada en los procesos operacionales en la perforación y tronadura se mencionarán a continuación las más relevantes:

- Permite la identificación de patrones y tendencias de los datos operativos, esto genera que haya mejoras constantes en los procesos de perforación y tronadura todo con el fin de aumentar la productividad e ir reduciendo los tiempos de inactividad.
- Cuenta con la capacidad de realizar planificaciones predictivas de condiciones operativas con lo son el desgaste de la maquinaria, esto permite mejorar la disponibilidad del equipo en cuestión y ayuda a reducir los costos de mantenimiento que no se tengan planificado.
- El monitoreo en tiempo real de operaciones hace que la seguridad aumente ya que permite que haya una identificación oportuna de situaciones con riesgos potenciales altos.
- Mejoras en la distribución de la carga explosiva en donde la analítica avanzada puede optimizar la tronadura posterior a la recopilación de los datos obtenidos, esto significa que puede identificar patrones en los que

se logre maximizar la fragmentación de la roca y reduciendo el consumo de explosivo.

- Facilita la simulación a través de la creación de modelos en donde se simulen diversos escenarios para la perforación, permitiendo una planificación más exacta y precisa.

La aplicación del Big Data y de la analítica avanzada en estos procesos unitarios (perforación y tronadura) no solo optimiza los procesos operativos involucrados sino que mejora a su vez la seguridad, reduce costos, y contribuye a una gestión sostenible y eficaz de los recursos al largo plazo.

8. Propuesta de una estrategia de implementación

La nueva tecnología seleccionada para realizar una estrategia de implementación es láseres, eso es debido a que este tipo de tecnología sigue siendo foco de investigación y de desarrollo activo, por lo tanto tener una estrategia general de una posible implementación es de suma relevancia para poder llevar a cabo su integración dentro de la industria minera ya que se facilita la adopción exitosa de la tecnología, en donde esta contribuye a maximizar los beneficios, minimizar los riesgos y garantizar que el proceso se lleve a cabo de la mejor manera.

Luz en alta potencia

El sistema de perforación de rocas con láser se vale de fibra óptica

RECEPCIÓN DE LA ENERGÍA

El sistema de perforación está compuesto por un módulo de energía y control y otro de perforación. En el módulo de perforación, un primer subsistema se encarga de la conexión, la distribución y el control de la energía que alimenta al segundo subsistema, que es donde se genera la luz.

PRODUCCIÓN DE LUZ

Se genera la luz láser y se la transporta vía fibra óptica hasta el lanzador, que es la interfaz de la sarta con el ambiente externo.

LANZADOR ÓPTICO

En este extremo, la luz pasa por lentes para la focalización y el direccionamiento. A partir de este punto, viaja libre por el medio externo, por una distancia que puede variar de 1 a 50 centímetros, hasta incidir sobre la superficie de la roca y calentarla.

HAZ DE LÁSER

El calor extremo producido lleva a la roca a su fractura o a la evaporación de la parte alcanzada por el haz de luz, lo que facilita la perforación.

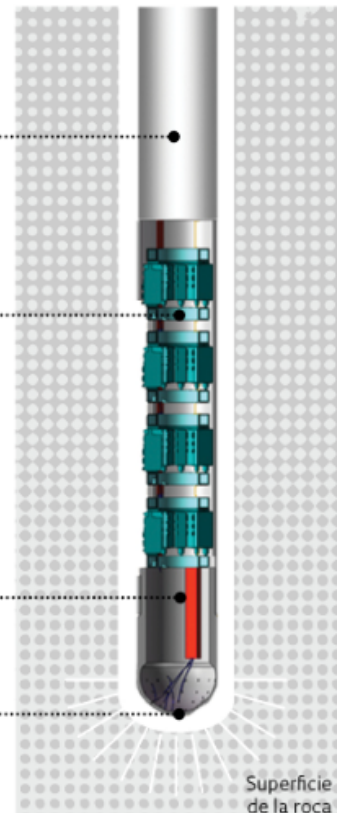


Figura 25. Diseño de Sistema de Perforación con láser de fibra óptica (Arthur Braga, PUC RIO, 2013)

8.1 Estrategia de implementación

La estrategia deberá cumplir con los siguientes parámetros, los cuales se detallarán a continuación:

8.1.1 Análisis y Evaluación previas

- ✓ Realizar un estudio geológico de la zona para poder comprender las características del tipo de roca y de los minerales que se encuentran

- ✓ Definir los factores específicos de la perforación, entre ellos se incluyen la profundidad, el ángulo, el diámetro y la potencia del láser.
- ✓ Analizar la topografía del lugar y evaluar las condiciones ambientales del sitio a perforar, temperatura y humedad por ejemplo.

8.1.2 Selección y pruebas de laboratorio

- ✓ Llevar a cabo una investigación y selección del láser de fibra óptica para el proceso en donde se considere los aspectos como la potencia, las longitudes de onda y duración.
- ✓ Hacer análisis de laboratorio en donde se compruebe la capacidad de perforar los distintos tipos de roca predominantes del sector.

8.1.3 Diseño y Control

- ✓ Diseñar y adaptar los actuales equipos de perforación para lograr integrar los láseres de fibra óptica.
- ✓ Implementar un sistema de enfriamiento para controlar las temperaturas de estructura subyacente del equipo que se generan cuando se está perforando, para evitar daños en el equipo y asegurándose de que la perforación se lleve a cabo
- ✓ Desarrollar un sistema de control de gran precisión del haz de luz, controles que incluyen su potencia, enforque y que se mantenga fijo en dirección deseada.
- ✓ Establecer una planificación de las mantenciones preventivas que se requieran garantizar un rendimiento continuo de los equipos.

8.1.4 Fases Piloto

- ✓ Seleccionar la sección específica para que se evalúen las condiciones operativas de rendimiento para su implementación en una situación real
- ✓ Crear una base de datos para recopilar la información de las fases piloto, en donde se evaluará la eficiencia, velocidad de perforación y calidad para analizar posibles oportunidades de mejora.

- ✓ Ajustar el sistema luego de haber obtenido los resultados de las primeras pruebas para ir optimizando el sistema si este lo requiere.

8.1.5 Documentación legal y Evaluación de Impacto

- ✓ Incluir manuales de operación y de mantenimiento, en donde se detalle claramente como opera el nuevo sistema de perforación y su posterior implementación dentro las operaciones.
- ✓ Cumplir con las regulaciones y normativas establecidas sobre uso de láseres en los entornos mineros, se deben considerar tanto regulaciones ambientales como de seguridad para los trabajadores.
- ✓ Monitorear las operaciones para identificar y evaluar los potenciales riesgos medio ambientales.

8.1.6 Capacitaciones y Formación técnica

- ✓ Realizar de manera continua capacitaciones técnicas para lo operadores y para el personal de mantenimiento, el propósito es que comprendan de manera correcta el funcionamiento de esta nueva tecnología, sus respectivos procedimientos y que el proceso se lleve a forma segura.
- ✓ Mantener una comunicación y trabajar de manera colaborativa con los fabricantes para integrar y entender de mejor manera cada parámetro del láser a utilizar, por otra o lado mantener esa comunicación puede servir en caso de que los fabricantes tengas nuevas mejoras para implementar, lo que ayudaría a optimizar de manera constante este tipo de tecnología.

8.2 Consideraciones y Recomendaciones

La potencia del láser es un factor sumamente importante, esto se debe a que en cuanto más potencia tenga el láser, mayor será su capacidad de perforar rocas con durezas más alta, pero tiene sus límites con respecto la eficiencia y del proceso en sí y su capacidad gestionar calor durante la perforación.

Tener control preciso de haz de laser será fundamental para dirigir y enfocar el haz de luz de forma exacta en la roca es esencial para obtener un buen resultado final de la perforación.

Se debe considerar que las propiedades de conducción de calor de la roca perjudican la eficiencia de la perforación. Las rocas con capacidades bajas de transmisión de calor pueden retener más la energía térmica, esta condición afecta de manera negativa al proceso.

La capacidad de perforación del láser en rocas duras dependerá del tipo de roca, ya que algunas rocas a ciertas longitudes de onda son más fáciles de fracturar lo que agiliza a la perforación.

La longitud de onda del rayo láser es un factor decisivo, ya que como se mencionó anteriormente cierto tipo de longitudes de onda pueden ser más eficaces en diferentes tipos de rocas, el punto clave en el proceso de perforación es la absorción de energía de parte de la roca.

Implementar un sistemas o emplear un dispositivo que tenga como función principal suministrar la energía necesaria que requiere el sistema de perforación laser, entre ellos se incluyen un fuente de energía, como lo podría ser la misma red eléctrica que se encuentre disponible en la mina, teniendo en cuenta si la infraestructura cuenta con la potencia necesaria para proporcionar la energía necesaria, de no ser así se podrían realizarse mejoras en dichas infraestructuras para cumplir con las demandas de energía solicitadas por el equipos. Otras opciones son utilizar generadores para lograr suministrar la energía en lugares remotos en donde no exista una red cercana de energía, también se podrían considerar el uso de baterías de litio, estas son capaces de almacenar reservas de energía durante varias horas y sus tiempos de recarga no suelen ser extensos. Por último se podrían tomar en consideración fuentes de energía renovables como paneles solares, o sistemas híbridos en los que se combinen fuentes convencionales con fuentes renovables para cumplir el mismo objetivo el cual es garantizar un suministro energía constante.

9. Conclusiones

En el presente trabajo se logró concretar y desarrollar el objetivos general como los objetivos específicos propuestos al principio, en donde principalmente se exploraron las diferentes técnicas utilizadas en los procesos de perforación y tronadura en la minería del cobre en Chile, analizando sus respectivas ventajas y funcionamiento, para poder comprender de mejor manera los métodos actuales, esto con fin de poder hallar puntos o nuevas técnicas de mejoras mediante las nueva tecnologías investigadas, y que dichas tecnologías son las que permiten que la industria minera siempre apunte hacia el mejoramiento continuo de los proceso más relevantes y fundamentales de la minería.

La realización de un estudio geológico fue de suma importancia para comprender las propiedades principales de las rocas y de cómo esto podría afectar a una posible implementación de algunas de las tecnologías investigadas. Con respecto a la tecnología de extracción por láseres y la tecnología de georadares, se puede decir que a pesar de sus diferencias de uso y funcionamiento ambas son aptas para su integración dentro de la industria, teniendo en cuenta el estudio geológico.

La propuesta de implementación es clave para poder llevar a cabo la integración de esta nueva tecnología, si bien en Chile no se han realizado pruebas en terreno con perforación laser por temas netamente de que la perforación laser en si aun se encuentra en fases de desarrollo, contar con una estrategia general de implementación puede garantizar que la adopción a futuro se pueda ejecutar de manera eficaz.

Si bien cada tecnología pude presentar limitaciones, tanto técnicas, de implementación y de costos asociados, entre otros, no se debe dejar de innovar en el sector minero ya que la tecnología avanza hacia nuevos descubrimientos que aportan de manera significativa, esto es sinónimo de prosperidad a futuro, ya que para las exigencias y desafíos se deberá estar preparados para poder afrontarlos

de manera eficiente y eficaz, algunos de estos desafíos pueden estar enfocados en: la búsqueda continua por aumentar la productividad, gestión de los equipos y recursos asociados, gestión de los costos, entre otros. A su vez no podemos dejar a un lado el desarrollo de la minería sustentable o minería verde, dichos procesos que si bien estas se encuentran en desarrollo y que son parte fundamental en el cuidado del medio ambiente y de las comunidades locales, en donde se busca gestionar de manera de manera sustentable la producción a través de energías renovables que disminuyan en gran medida los impactos ambientales asociados.

La minería y la tecnología significan nuevas oportunidades para el país porque estas dos grandes industrias potencian las áreas de seguridad, productividad y sustentabilidad.

10. Referencias

- Fincheira, V., & Araneda, H. (2018, junio). *Impacto de las Nuevas Tecnologías en las Competencias Requeridas por la Industria Minera*. CCM-Eleva. Disponible en: https://www.ccm.cl/wp-content/uploads/2020/09/IMPACTO-DE-LAS-NUEVAS-TECNOLOG%C3%8DAS_2018.pdf
- APTA. (2021, mayo). *Minería del futuro para una operación inteligente y sustentable*. OVTT. Disponible en: <https://www.ovtt.org/wp-content/uploads/2021/09/Mineria-del-futuro-final.pdf>
- Interempresas. (2017, 2 noviembre). *Avances tecnológicos en la perforación y voladura de rocas*. Minería y Canteras. Disponible en: <https://www.interempresas.net/Mineria/Articulos/203363-Avances-tecnologicos-en-la-perforacion-y-voladura-de-rocas.html>
- MIA. (2021, 12 Julio). *El futuro de la tecnología de minería subterránea en 2021 y más allá*. Fucheng LHD. Disponible en: <https://fuchenglhd.com/es/blog/el-futuro-de-la-tecnologia-de-mineria-subterranea-en-2021-y-mas-alla/>
- mineARC. (2018, 18 junio). *Tecnologías Más Inteligentes Para Minas Más Seguras Y Más Productivas*. Minerarc Systems. Disponible en: <https://minearc.com/tecnologias-mas-inteligentes-para-minas-mas-seguras-y-mas-productivas/?lang=es>
- Jubera, N., Jara, J. J., Louit, D., Barrientos, C., Carmona, S., Urzúa, O., Klein, P., Reyes, L., & Guzmán, J. I. (2020, 11 junio). *Hacia una minería 4.0: Recomendaciones para impulsar una industria nacional inteligente*. CESCO. Disponible en: <https://www.cesco.cl/wp-content/uploads/2020/06/Hacia-una-miner%C3%ADa-4.0.-Recomendaciones-para-impulsar-una-industria-nacional-inteligente-1-2.pdf>
- Farías, S. (2023, noviembre 9). *El Big Data y sus aportes a la industria minera*. Diario Estrategia. Disponible en: <https://www.diarioestrategia.cl/texto-diario/mostrar/4526033/big-data-aportes-industria-minera>

- Ruiz del Solar, J. (2022, septiembre). *Big Data en Minería*. Beauchef minería. Disponible en: https://www.beauchefmineria.cl/wp-content/uploads/2020/09/Estudio_BIGDATA.pdf
- Durrant-Whyte, H., Geraghty, R., Pujol, F., & Sellschop, R. (2015). How digital innovation can improve mining productivity. McKinsey & Company.
- World Economic Forum. (2017). Digital Transformation Initiative: Mining and Metals Industry.
- Sonami. (2022). *Caracterización de las capacidades y competencias digitales del capital humano de la minería chilena*. En Sonami. Disponible en: <https://www.sonami.cl/v2/wp-content/uploads/2022/07/Estudio-Caracterizacion-Competencias-Digitales-Mineria.pdf>
- MCH. (2022, febrero). *Minería Inteligente: El impacto del Big Data en las operaciones*. Minería Chilena. Disponible en: <https://www.mch.cl/wp-content/uploads/2022/02/MCH-488.pdf>
- Muñoz, C. (2022, agosto). *Uso de capas de información geográfica para determinar áreas potenciales con EVNT*. Chile Polimetálico. Disponible en: <https://chilepolimetalico.cl/wp-content/uploads/2020/08/Presentacio%CC%81n-C.-Mun%CC%83oz-completa.pdf>
- Da Silveira, E. (2013, octubre). *Minería con láser*. Revista Pesquisa. Disponible en: <https://revistapesquisa.fapesp.br/es/mineria-con-laser/>
- Herrera Herbert, J. (2007). Introducción a los fundamentos de la Tecnología Minera. Universidad Politécnica de Madrid.
- Huella Minera. (2016, agosto). *El georadar es un aliado en prospección*. Disponible en: <https://huellaminera.com/2016/08/georadar-aliado-prospeccion/>
- Avilés, L., & Cañar, M. (2019, 28 noviembre). *GUÍA PARA EL USO DEL EQUIPO GEORADAR*. OER Commons. Disponible en: <https://oercommons.org/courseware/lesson/60185/student/?section=7>

MALA GEOSCIENCE, (2009). Operating Manual v. 1.6. MALÅ Easy Locator. Corporate Headquarters. Disponible en: www.malags.com

MALA GEOSCIENCE, (2009). Operating Manual v. 2.0. MALÅ X3M Control Unit. Corporate Headquarters. Disponible en: www.malags.com

Goodman, D., y Piro, S. (2013). GPR Remote Sensing in Archaeology. Springer. Volumen 9. Páginas: 159-174.

MCH. (2021, 28 abril). *Sandvik lanza iSURE 8.1: el software de excavación de roca subterránea.* Minería Chilena. Disponible en: <https://www.mch.cl/2021/04/28/sandvik-lanza-isure-8-1-el-software-de-excavacion-de-roca-subterranea/>

SANDVIK. (2011, 26 enero). iSURE® Avance en Precisión Software de gestión de proyectos de túneles. Interempresas. Disponible en: https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/17738/7/iSURE_softwaretuneles.pdf

SERNAGEOMIN. (2020, junio). *GUÍA DE SEGURIDAD MINERA SOBRE PLANES DE CONTINGENCIA POR REDUCCIONES DE PERSONAL, DETENCIONES PRODUCTIVAS O RALENTIZACIÓN DE OPERACIONES.* SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA. Disponible en: https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2020/06/Guia_Ralentizacion_2020.pdf

IST. (2016, diciembre). *D.S. N° 594 APRUEBA REGLAMENTO SOBRE CONDICIONES SANITARIAS Y AMBIENTALES BÁSICAS EN LOS LUGARES DE TRABAJO.* Disponible en: <https://www.ist.cl/wp-content/uploads/2016/12/siliceDECRETO-SUPREMO-N%C2%B0-594-actualizado.pdf>

INACAP. (s. f.). EXTRACCIÓN MINA I: APUNTES EXPLOSIVOS.
https://www.inacap.cl/web/material-apoyo-cedem/alumno/Mineria-y-Geomatica/AAI_OPEX01_Material_Extraccion_Mina_I_Explosivos.pdf

Ventius. (2016). *POLVO EN MINERÍA SISTEMAS CONTROL DE POLVO*.
Disponble en: <http://www.ventius.cl/docs/Ventius%20Polvo%20en%20Mineria%202016.pdf>

Geotecnia fácil. (s. f.). *Geología de Atacama, Chile: rasgos geomorfológicos y geológicos*. Disponible en: <https://geotecniafacil.com/geologia-atacama/#:~:text=La%20geolog%C3%ADa%20de%20Atacama%20se,en%20menor%20medida%20rocas%20metam%C3%B3rficas.>

De la Paz Melledo, V., & Pilar Lambert. (2018, mayo). *Vibraciones en edificios: Estándares de medición y efectos en la Legislación Extranjera*. Biblioteca del Congreso Nacional. Disponible en: https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/25701/2/BCN__vibraciones_en_edificios_Definitivo.pdf

11. Anexos

Anexo 1: Tabla de las medidas de seguridad para el control prevención.

Instalaciones Críticas	Ejemplos de medidas de control o preventivas
Minas Subterráneas	<ul style="list-style-type: none">• El plan deberá considerar el bloqueo de accesos tales como: bocaminas, piques, socavones, rampas, chimeneas de ventilación, excavaciones, zonas de colapso, subsidencias, identificando los tipos de riesgos según el análisis pertinente.• En materias de Estabilidad, el plan deberá considerar la identificación de los sectores de posibles hundimientos provocados por subsidencia identificándolas y señalizándolas.• En caso de planificar el cierre de Almacén de Explosivos (Polvorines), se deberá tomar las medidas necesarias para resguardar el explosivo almacenado, de ser necesario se deberá incorporar vigilancia del polvorín.• De ser necesario, el plan deberá considerar la desenergización de todas las instalaciones y equipos (pudiendo exceptuarse los sistemas de iluminación).• El plan debiera considerar la evaluación del estado operativo del sistema de detección y control de incendios, ya sea automáticos, semi automáticos y manuales.

Minería a Rajo Abierto	<ul style="list-style-type: none"> • El plan deberá considerar la señalización y/o bloqueo del sector detenido, identificando los tipos de riesgos según el análisis pertinente. • En caso de planificar el cierre de Almacén de Explosivos (Polvorines), el plan debiera tomar las medidas necesarias para resguardar el explosivo almacenado, de ser necesario se deberá incorporar vigilancia del polvorín.
------------------------	--

Fuente: SERNAGEOMIN. 2020

Anexo 2: Tabla de los límites permisibles para piel y ojos (Longitud de onda de 320 nm a 400 nm).

Tiempo de Exposición	Densidad de Energía o de Potencia
Menor de 16 minutos	1J/cm ²
Mayor de 16 minutos	1mW/cm ²

Fuente: IST. 2016

Anexo 3: Tabla de los tiempos máximos de exposición permitido para la piel y ojos (Longitud de onda de 200nm a 315 nm).

Tiempo de Exposición		Densidad de Potencia ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)
8	Horas	0,1
4	Horas	0,2
2	Horas	0,4
1	Hora	0,8
30	Minutos	1,7
15	Minutos	3,3
10	Minutos	5,0
5	Minutos	10
1	Minuto	50
30	Segundos	100
10	Segundos	300
1	Segundo	3.000
0,5	Segundo	6.000
0,1	Segundo	30.000

Fuente: IST. 2016

Anexo 4: Tabla de Permeabilidad relativa (ϵ_r) y velocidades de propagación de la OEM

Material	ϵ_r	Velocidad (m/μs)
Aire	1	300
Agua (Salada)	81	25,4
Agua (Pura)	81	33,3
Asfalto	6	122,5
Basalto	8	106
Caliza (Mojada)	12	85,2
Concreto	7	113,4
Granito	5	134,2
Arenisca (Mojada)	6	121,1
Arena (Seca)	9	100
Suelo Limoso (Seco)	2,5	189,7
Suelo Limoso (Mojado)	19	68,8
Suelo Arenoso (Seco)	2,5	189,7
Suelo Arenoso (Mojado)	25	60
Suelo Arcilloso (Seco)	2,4	193,6
Suelo Arcilloso (Mojado)	15	77,2
Morrenas	9 - 25	60 - 100
Hielo	3 - 4	150 - 173
Permafrost	4 - 8	106 - 150
Esquisto	5 - 15	77 - 134

Fuente: OER commons 2019, MALA GEOSCIENCE, Goodman 2013

Anexo 5: Tabla de las especificaciones técnicas del Georadar Leica DS2000

DUAL-FREQUENCY ANTENNA		
Antenna footprint	40 x 50 cm	
Hardware channels	2	
Antenna central frequencies	250 MHz and 700 MHz	
Antenna orientation	Perpendicular, broadside	
Sampling frequency	400 kHz	
DATA ACQUISITION		
Acquisition speed	More than 10 km/h	
Scan rate per channel for 512 samples per scan	381 scans per second	
Scan interval	42 scan per metre	
Positioning	2 integrated encoders - GPS and/or TPS	
CONTROL UNIT		
Power consumption / supply	13.3 W / Rechargeable SLAB (Sealed Lead Acid Battery) 12 V DC, 12 Ah	
Operating temperature range	-10° C to +40° C	
Weight	24 kg	27 kg
Protection	IP65	

Fuente: Villner, s.f

Anexo 6: Espectroscopia laser

La espectroscopía láser es una técnica que utiliza la interacción de la luz láser con la materia para analizar las propiedades de los materiales y proporcionar información detallada sobre su composición química y estructura molecular. Si bien la espectroscopía láser puede tener aplicaciones en diversos campos, como la química, la física y la biología, su uso específico en la perforación y tronadura en la industria minera es limitado. A continuación, se detallan algunas consideraciones sobre las fortalezas y debilidades de la aplicación de la espectroscopía láser en estos procesos:

Fortalezas

Análisis rápido y en tiempo real: Se puede proporcionar resultados rápidos y en tiempo real, lo que permite una monitorización continua de las propiedades de la roca durante la perforación y la tronadura. Esto puede ser útil para optimizar la

producción y ajustar los parámetros de perforación y tronadura en función de las características de la roca en tiempo real.

Identificación de cambios en la composición mineral: La espectroscopía láser puede ayudar a identificar cambios en la composición mineral de la roca, lo que puede ser útil para detectar zonas de interés con mayor concentración de minerales valiosos o identificar cambios en la mineralogía que podrían afectar la eficiencia de la tronadura.

Control de calidad de los explosivos: La espectroscopía láser puede utilizarse para analizar la composición química de los explosivos utilizados en la tronadura y verificar su calidad. Esto ayuda a garantizar que los explosivos cumplan con las especificaciones requeridas y que la tronadura se realice de manera segura y eficiente.

Debilidades

Limitaciones en la penetración de la luz láser: La espectroscopía láser puede tener limitaciones en la penetración de la luz en la roca, especialmente en materiales densos o cuando se encuentran capas superpuestas de diferentes materiales. Esto puede dificultar la obtención de lecturas precisas de la composición mineral en profundidades significativas durante la perforación y la tronadura.

Necesidad de condiciones óptimas de iluminación: Se requieren condiciones óptimas de iluminación y puede ser sensible a factores como la presencia de polvo, la humedad, la presencia de gases u otras interferencias. En entornos mineros, donde puede haber condiciones adversas, como alta concentración de polvo o humedad, la calidad de las mediciones puede verse afectada.

Costos y requerimientos técnicos: La implementación de la espectroscopía láser en la perforación y tronadura puede requerir inversiones significativas en equipos especializados y capacitación técnica. Además, los costos de mantenimiento y calibración de los equipos pueden ser considerables.

Las distintas técnicas de espectroscopía utilizan diferentes instrumentos y equipos para llevar a cabo el análisis de las radiaciones electromagnéticas en diferentes regiones del espectro. Se presentarán a continuación algunos de los instrumentos más comunes utilizados en diversas espectroscopías y su aplicabilidad:

Espectroscopía de Absorción Ultravioleta-Visible (UV-Vis):

Espectrofotómetro UV-Vis: Este instrumento mide la absorbancia o transmitancia de la luz en la región UV-Vis. Se utiliza para determinar la concentración de sustancias en muestras líquidas o gaseosas, así como para estudiar la estructura electrónica de compuestos orgánicos e inorgánicos.

Espectroscopía de Infrarrojo (IR):

Espectrómetro de Infrarrojo: Este instrumento utiliza un interferómetro y detectores sensibles al IR para medir la absorción y emisión de la radiación en la región del infrarrojo. Se utiliza para identificar compuestos orgánicos y determinar su estructura molecular y grupos funcionales.

Espectroscopía Raman:

Espectrómetro Raman: Este instrumento utiliza un láser para irradiar la muestra y mide la dispersión inelástica de la luz, conocida como dispersión Raman. Se utiliza para identificar y analizar la composición química de materiales sólidos, líquidos y gaseosos, así como para estudiar las vibraciones moleculares.

Espectroscopía de Resonancia Magnética Nuclear (RMN):

Espectrómetro de RMN: Este instrumento utiliza un potente imán y pulsos de radiofrecuencia para excitar los núcleos atómicos y medir las señales electromagnéticas emitidas. Se utiliza para determinar la estructura molecular, la composición y la dinámica de las moléculas orgánicas e inorgánicas.

Espectrometría de Masas (MS):

Espectrómetro de Masas: Este instrumento mide la relación masa-carga de iones generados a partir de una muestra. Se utiliza para determinar la composición y estructura molecular, así como para identificar compuestos orgánicos e inorgánicos en una muestra.

Espectroscopía de Emisión y Absorción de Rayos X:

Espectrómetro de Rayos X: Este instrumento utiliza fuentes de rayos X y detectores para medir la absorción y emisión de rayos X en una muestra. Se utiliza para analizar la composición elemental de materiales sólidos, líquidos y gaseosos, así como para investigar la estructura atómica y la cristalografía.

Espectroscopía de láser de femtosegundos: Permite investigar procesos ultra rápidos en escalas de tiempo femtosegundos, como reacciones químicas, dinámica molecular y transporte de carga en materiales.

Espectroscopía de láser de alta resolución: Proporciona información precisa sobre niveles de energía y transiciones en átomos y moléculas, permitiendo el estudio de la física atómica y molecular, la espectroscopía de precisión y la metrología.

Anexo 7: Espectro Electromagnético

El espectro electromagnético es la gama completa de todas las frecuencias posibles de radiación electromagnética. Esta radiación electromagnética incluye todas las longitudes de onda de luz visible, así como otras formas de radiación, como ondas de radio, microondas, infrarrojos, luz ultravioleta, rayos X y rayos gamma. El espectro electromagnético abarca desde longitudes de onda muy largas, como las ondas de radio, hasta longitudes de onda extremadamente cortas, como los rayos gamma.

El espectro electromagnético se organiza en función de las longitudes de onda o frecuencias de la radiación. La relación entre la longitud de onda y la frecuencia está determinada por la velocidad de la luz en el vacío, que es una constante universal. En general, a medida que la longitud de onda disminuye, la frecuencia aumenta y viceversa.

Seguidamente se presentará una descripción general de las diferentes regiones del espectro electromagnético, desde las longitudes de onda más largas a las más cortas:

Ondas de radio: Las ondas de radio tienen las longitudes de onda más largas en el espectro electromagnético, que van desde varios metros hasta miles de kilómetros. Se utilizan en aplicaciones de comunicaciones inalámbricas, como la radio AM y FM, la televisión, los sistemas de comunicación por satélite y las comunicaciones móviles.

Microondas: Las microondas tienen longitudes de onda más cortas que las ondas de radio, que van desde milímetros hasta varios centímetros. Se utilizan en aplicaciones como hornos de microondas, comunicaciones inalámbricas de alta velocidad, radares y tecnología de enlace de datos.

Infrarrojo: La radiación infrarroja abarca un rango de longitudes de onda más cortas que las microondas, generalmente desde unos pocos micrómetros hasta unos pocos milímetros. Se utiliza en aplicaciones como sistemas de visión nocturna, sensores de movimiento, termografía y comunicaciones ópticas.

Luz visible: La luz visible es la porción del espectro electromagnético que es perceptible por el ojo humano y abarca longitudes de onda de aproximadamente 400 a 700 nanómetros. Se divide en diferentes colores, como el rojo, el naranja, el amarillo, el verde, el azul y el violeta. La luz visible es fundamental para la visión humana y se utiliza en una amplia gama de aplicaciones, desde iluminación hasta tecnología de visualización.

Ultravioleta: La radiación ultravioleta tiene longitudes de onda más cortas que la luz visible, generalmente desde unos pocos nanómetros hasta unos pocos cientos de nanómetros. Se divide en estas tres categorías: UV-A, UV-B y UV-C, según su longitud de onda. El ultravioleta se utiliza en diferentes aplicaciones como desinfección, fototerapia, espectroscopia y fotolitografía.

Rayos X: Los rayos X tienen longitudes de onda más cortas que la radiación ultravioleta, generalmente desde unos pocos picómetros hasta unos pocos nanómetros. Se utilizan en aplicaciones médicas, como radiografías y tomografías computarizadas, así como en investigación científica y pruebas no destructivas.

Rayos gamma: Los rayos gamma tienen las longitudes de onda más cortas y las frecuencias más altas en el espectro electromagnético. Se generan en procesos nucleares y tienen aplicaciones en medicina nuclear, radioterapia y detección de materiales radiactivos.

Con referencia al Espectro Electromagnético tenemos dos fórmulas que son fundamentales para su estudio en la ciencia y tecnología.

La primera tiene que ver con la relación entre la longitud de onda (λ) y la frecuencia (f) en el espectro electromagnético están determinadas por la velocidad de la luz (c), la cual es una constante universal. La fórmula que se presenta a continuación expresa dicha relación:

$$c = \lambda * f$$

En donde:

c : es la velocidad de la luz en el vacío (este valor es aproximadamente 299,792,458 metros por segundo).

λ : es la longitud de onda de la radiación electromagnética.

f : es la frecuencia de la radiación electromagnética.

Con esta relación se puede la frecuencia de una radiación dado si se conoce la longitud de onda, y viceversa.

En cuanto a la relación inversa entre la longitud de onda y la frecuencia tenemos lo siguiente, y es que a medida que disminuye la longitud de onda, la frecuencia aumenta, y viceversa. Esto significa que entre más cortas son las longitudes de onda de las radiaciones, tienen frecuencias más altas, como lo son por ejemplos los rayos gama. Por otro lado, las radiaciones con longitudes de onda más largas tienen frecuencias más bajas, como lo son las ondas de radio.

Cabe destacar que la energía de una radiación electromagnética está relacionada con su frecuencia, ya que a medida que la frecuencia aumenta, la energía de radiación también aumenta. Esto quiere decir que las radiaciones de alta frecuencia (rayos gama y rayos X) tienen mayor energía que las radiaciones con baja frecuencia (ondas de radio).

La segunda formula establece la relación entre la energía (E) de una radiación electromagnética y su frecuencia (f) está determinada por la constante Planck (h): esta relación se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$E = h * f$$

Donde:

E: es la energía de radiación electromagnética.

h: es la constante de Planck (aproximadamente 6.626×10^{-34} julios segundos).

f: es la frecuencia de la radiación electromagnética.

Esta relación explica que la energía de una radiación electromagnética es directamente proporcional a su frecuencia. Por ello a medida que aumenta la frecuencia, la energía de radiación electromagnética también aumentara.

Aquí es importante tener en cuenta que la relación entre a energía y la frecuencia es lineal, y que la constante de proporcionalidad (constante de Planck) es sumamente pequeña. Por lo tanto el cambio de energía de una radiación es debido a un cambio pequeño en su frecuencia, esto se da por lo general en la mayoría de los casos.

Anexo 8: Tabla de medidas de aceleración de la vibración y sus grados de percepción.

r.m.s. weighted acceleration (m/s ²)	Perception
< 0.01	Not perceptible
----- 0.015 -----	Threshold of perception
----- 0.02 -----	Barely perceptible
----- 0.08 -----	Easily perceptible
----- 0.315 -----	Strongly perceptible
> 0.315	Extremely perceptible