



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOFISICA

Obtención de Parámetros para Ecuación de Ground Motion en Sector Pilar Norte

Por: Gianinna Andrea Pavez Santis

Habilitación profesional presentada a la Facultad de Ciencias Físicas y
Matemáticas de la Universidad de Concepción para optar al título
profesional de Geofísico

Profesional Guía: Patricio Jorquiera Péndola

Profesor Supervisor: Dr. Matthew Miller

Comisión Evaluadora:

Patricio Jorquiera Péndola

Dr. Matthew Miller

Dr. Arturo Belmonte-Pool

Abril 2022

Concepción, Chile

© 2022, Gianinna Andrea Pavez Santis

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

*A mi abuelo, quien me apoyó desde el primer momento.
Ojalá hubieses estado aquí. Un abrazo al cielo.*

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quisiera agradecer al tutor y guía de esta tesis de pregrado, el Sr. Patricio Jorquiera Péndola, por depositar su confianza en mí para el desarrollo de este trabajo y por cada consejo, idea y motivación que me entregó a lo largo de estos meses. A Codelco División El Teniente, por otorgarme la oportunidad de aportar con esta investigación al desarrollo del área sísmica dentro de la institución.

Agradecer al profesor Matthew Miller, por ser el primero que confió en mi trabajo y aportó a mi desarrollo académico y tesis de manera importante. Además, mencionar al profesor Klaus Bataille y a la profesora Ignacia Calisto, por ser docentes inspiradores en virtud de convertirme en geofísico.

Mencionar a mis padres, Marcela y Fernando, quienes a pesar de las reiteradas dificultades apostaron por creer en que su hija lograría su anhelado sueño de dedicarse a la ciencia. A mis hermanos, Javier y Eliane, quienes me apoyaron siempre dándome ánimos y sonrisas en los momentos más difíciles. A mi tía María Teresa, quien me apoyó incondicionalmente para completar mi período como estudiante. Y por supuesto a mis abuelos, que no tuvieron más que palabras de aliento para mí en todo momento.

También agradecer a quienes conocí gracias a la carrera, Gonzalo, quien con paciencia infinita me apoyó incondicionalmente y me motivó siempre a creer en mis capacidades. Sin ti, jamás hubiese llegado hasta acá. También a Nicolás, Hans y Nadia, gracias por las risas, las conversaciones, el apoyo y el aguante.

Por supuesto, también a los amigos que hice gracias a la decisión de estudiar en Concepción, Nicole, Carlos y Nataly, muchas gracias por cada comida y tecito compartido en los días buenos y como no, en los más difíciles de la vida como estudiantes. A los amigos virtuales que siempre estuvieron para mí, Beca, Malena, Maru y Yae, quienes a pesar de las distancias, siempre me mostraron su apoyo. Y por último y no menos importante, a las patitas y maullidos de Sheldon que siempre me acompañaron en mis noches de estudio.

Resumen

Dado que la minería no es un proceso espontáneo, sino que presenta repentinos cambios de estrés en el macizo rocoso, que pueden manifestarse directamente en daños visibles como la eyección de material por estallido de roca, se hace fundamental establecer una metodología que aporte a la prevención, control y alerta ante el peligro sísmico, asegurando la integridad de los trabajadores y la continuidad de la producción.

Enfocados en esta dirección nos encontramos con la *Ground Motion Prediction Equation (GMPE)* o *Ecuación Predictora de Movimiento del Suelo*, la cual corresponde a una relación que nos entrega el valor esperado de velocidad máxima del suelo (*Peak Ground Velocity*). Esta se encuentra en función de la magnitud momento y la distancia hipocentral. Su principal utilidad es predecir movimiento del suelo causado por grandes eventos que puedan presentarse en un futuro, con base en el registro de ground motion de eventos de menor magnitud.

El correcto empleo de esta metodología permitiría comprender la manera en que el macizo rocoso responde a procesos de cambios abruptos de estrés, tal y como los que se originan a causa de los procesos mineros.

De la guía publicada por *Mendecki (2018)*, *Mine Seismology Reference Book*, surgen las bases para la ecuación de movimiento del suelo dada para este trabajo, para la cual buscamos obtener sus coeficientes dependientes de la magnitud, distancia y valor libre, que nos entrega los valores de velocidad máxima en términos de la *Peak Particle Velocity*. Lo anterior, ajustado a los datos de explosiones en el sector de Pilar Norte, Mina El Teniente, registrados entre enero de 2018 y octubre de 2021.

Para resolver el ajuste de dichos parámetros, se aplica una limpieza y reordenamiento de la base de datos, previo a aplicar la metodología de inversión por mínimos cuadrados para un sistema de N ecuaciones con tres incógnitas. Además, se realiza un análisis de distribución de las principales variables involucradas y un análisis estadístico de las velocidades máximas recalculadas tras las inversiones.

Se consiguen resultados de 0.07 para el parámetro dependiente de la magnitud, 1.43 para el que acompaña a la distancia hipocentral y finalmente, de 0.2 para el término libre, los cuales llegan a distar hasta en 3 unidades de los valores que se

tenían como referencia para otros sectores diferentes al estudiado.

De todas maneras, se consigue el objetivo principal y se encuentran los valores buscados para la ecuación de ground motion con datos del sector de interés, vislumbrando la posibilidad de reproducir nuevamente este trabajo para diferentes antecedentes o nuevos sectores. Considerando por supuesto, todos los cambios y recomendaciones que se desprenden del análisis y observaciones de este trabajo, sobre todo contar con la información más completa posible a la hora de implementarlo.

Keywords – Ground Motion, Sismicidad inducida, Monitoreo Sísmico, Inversión

Abstract

Since mining isn't a spontaneous process, but presents sudden stress changes in the rockmass, which can manifest directly in visible damage such as the ejection of material by rockbursting, it's essential to establish a methodology that contributes to the prevention, control and alert to seismic risk, ensuring the integrity of workers and the continuity of production.

Focused in this direction we find the Ground Motion Prediction Equation (GMPE), which corresponds to a relationship that gives us the expected value of maximum ground velocity (Peak Ground Velocity). This is found as a function of moment magnitude and hypocentral distance. Its main utility is to predict ground motion caused by large events that may occur in the future, based on the ground motion record of events of smaller magnitude.

The correct use of this methodology would allow us to understand how the rockmass responds to processes of abrupt changes in stress, such as those caused by mining processes.

From the guide published by *Mendecki* (2018), *Mine Seismology Reference Book*, the bases for the ground motion equation given for this work arise, for which we seek to obtain its coefficients dependent on the magnitude, distance and free value, which gives us the maximum velocity value in terms of *Peak Particle Velocity*. The foregoing, adjusted to the data of explosions in the Pilar Norte sector, Mina El Teniente, recorded between January 2018 and October 2021.

To solve the adjustment of these parameters, a cleaning and rearrangement of the database is applied, prior to applying the least squares inversion methodology for a system of N equations with three unknowns. In addition, a distribution analysis of the main variables involved and a statistical analysis of the maximum velocities recalculated after the inversions.

Results of 0.07 are obtained for the magnitude-dependent parameter, 1.43 for the one that accompanies the hypocentral distance and finally, 0.2 for the free term, which are up to 3 units away from the values that were taken as reference for other sectors than the one studied.

In any case, the main objective is achieved and the values searched for the ground motion equation are found with data from the sector of interest, envisioning the

possibility of reproducing this work again for different antecedents or new sectors. Considering of course, all the changes and recommendations that emerge from the analysis and observations of this work, especially having the most complete information possible when implementing it.

Keywords – Ground Motion, Induced Seismicity, Seismic Monitoring, Inversion

Índice general

AGRADECIMIENTOS	I
Resumen	II
Abstract	IV
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	2
1.1.1. División El Teniente	3
1.1.2. Generalidades de Pilar Norte	4
1.2. Método de Explotación: Hundimiento de Paneles	5
1.2.1. Fracturamiento Hidráulico	7
1.3. Sismicidad Inducida por Actividad Minera	9
1.4. Red de Monitoreo Sísmico	11
1.4.1. Sistema Sísmico Mina El Teniente	12
1.5. Método de Ground Motion	14
1.5.1. Ley de Gutenberg-Richter	15
1.5.2. Ecuación de Predicción de Movimiento del Suelo (GMPE) y Variables Predictoras	15
1.6. Objetivos	20
1.6.1. Objetivo General	20
1.6.2. Objetivos Especificos	20
2. Metodología	22
2.1. Área de Estudio	22
2.2. Descripción de Estaciones Sísmicas	24
2.3. Procesamiento de Datos	25
2.4. Inversión de la Ecuación de Ground Motion	28
2.4.1. Inversión por Método de Mínimos Cuadrados	29
3. Resultados y Análisis	31
3.1. Resultados	31
3.2. Análisis	34
3.2.1. Análisis de Distribución de las Variables de la Ecuación de Ground Motion	34
3.2.2. Análisis de Distribución del Peak Particle Velocity	38

Índice general	VII
3.2.3. Análisis Estadístico del Peak Particle Velocity	40
4. Discusión	43
5. Conclusión y Recomendaciones	46
5.0.1. Recomendaciones	47
Referencias	48
Apéndices	51
A. Anexo	51
A.1. Gráficas Relacionadas al Estudio	51

Índice de cuadros

2.1. Contenido de los archivos de explosiones.	27
3.1. Valores de los parámetros c_1 , c_2 , c_3 de la ecuación 1.5 referenciales, tras la primera inversión y tras una segunda inversión.	31
3.2. Valores Mínimo, Promedio y Máximo para las variables predictoras Magnitud Momento M_w , Distancia Hipocentral R y la variable de Velocidad Máxima (PPV), para información No Filtrada y posteriormente Filtrada (datos descartados).	34
3.3. Valores Mínimo, Promedio y Máximo para las variables predictoras Magnitud Momento M_w , Distancia Hipocentral R y la variable de Velocidad Máxima (PPV), para información en base logaritmo de 10 para distancia y el PPV más la agrupada en celdas (bins).	35
3.4. Valores Mínimo, Promedio y Máximo para la variable de Velocidad Máxima (PPV), con los datos originales más los de la primera y segunda inversión. Las cantidades se presentan en formato sin logaritmo (No Log) y con logaritmo en base 10 (Log).	38
3.5. Valores de Correlación para los datos Originales comparados con el resultado de PPV de la inversión 1, datos originales comparados con el resultado de la inversión 2 y correlación entre los PPV de ambas inversiones. Además diferencias entre los coeficientes c_1 , c_2 y c_3 entre los obtenidos de las dos inversiones con los parámetros originales y diferencia entre los coeficientes obtenidos de las inversiones.	40

Índice de figuras

1.1. Ubicación Geográfica de Codelco División El Teniente.	3
1.2. Sectores de Producción Mina El Teniente (Díaz y Morales,2008).	4
1.3. Ubicación Sector Pilar Norte (Muñoz et al.,2018).	5
1.4. Método de Explotación Panel Caving y Malla de Extracción Mina El Teniente (mineraiyconstrucci0.wixsite.com)	8
1.5. Sismicidad en sector Pilar Norte, Mina El Teniente entre enero 2018 y octubre 2021. Vista desde arriba (izquierda) y vista en profundidad (derecha). Facilitada por Patricio Jorquiera.	10
1.6. Sistema Sísmico Mina El Teniente. Revista El Teniente N°2466, Enero 2021.	14
2.1. Modelo Litológico 3D.Estructuras Mayores e Intermedias de Pilar Norte(Superintendencia Geología,Noviembre 2017).	23
2.2. Distribución Espacial de las Estaciones Originales (azul) y las Estaciones Utilizadas en el estudio (verde).	24
2.3. Distribución de las explosiones en plano Este- Norte coordenadas mina.	25
2.4. Acercamiento a la Distribución Espacial de los eventos sobre el sector de Pilar Norte y de las estaciones originales y usadas.	26
3.1. Gráfica Logaritmica de la Distancia Hipocentral en metros y Velocidad Máxima (PPV) en metros por segundo para los valores originales previo a la inversión. Además, la barra de colores representa la Magnitud Momento (M_w) en [Nm].	32
3.2. Gráfica Logaritmica de la Distancia Hipocentral en metros y Velocidad Máxima (PPV) en metros por segundo. Recalculada con los coeficientes resultantes de la primera inversión. Además, la barra de colores representa la Magnitud Momento (M_w) en [Nm].	32
3.3. Gráfica Logaritmica de la Distancia Hipocentral en metros y Velocidad Máxima (PPV) en metros por segundo.Recalculada con los coeficientes de la segunda inversión. Además, la barra de colores representa la Magnitud Momento (M_w) en [Nm].	33
3.4. Histograma para los valores de Magnitud Momento o Hanks-Kanamori para datos originales, filtrados, previo a las celdas y posterior a estas. El eje horizontal representa la Magnitud Momento o Hanks-Kanamori y el eje vertical el número de eventos.	36

3.5.	Histograma para los valores de Distancia Hipocentral para datos originales, filtrados, previo a las celdas y posterior a estas. El eje horizontal representa la distancia hipocentral en metros y el eje vertical la cantidad de eventos.	37
3.6.	Histograma para los valores de Peak Particle Velocity para datos originales, filtrados, previo a las celdas y posterior a estas. El eje horizontal representa los valores de velocidad máxima en metros por segundo y eje vertical el número de eventos.	37
3.7.	Histograma Comparativo para los valores de Peak Particle Velocity (PPV) para datos originales, primera inversión y segunda inversión. El eje horizontal representa los valores de velocidad máxima en metros por segundo y el eje vertical el número de eventos.	39
3.8.	Histograma Comparativo para los valores de Peak Particle Velocity (PPV) para datos originales, primera inversión y segunda inversión. El eje horizontal se encuentra en base Logaritmo de 10 y representa la velocidad máxima en metros por segundo. El eje vertical representa el número de eventos.	39
3.9.	Gráfica Comparativa de Nube de puntos y Correlación entre el PPV Original con el PPV de la primera inversión (arriba). Nube de Puntos Correlación entre el PPV Original y la segunda inversión (abajo). . . .	41
3.10.	Nube de Puntos y Ajuste Comparativo del PPV Original versus los obtenidos por inversión.	42
4.1.	Distribución Espacial de las Estaciones Sísmicas Originales (verde) y Usadas (azul), además de los eventos (rojo) y la línea negra delimita el Frente de Pilar Norte.	43
4.2.	Gráfica comparativa de distancia hipocentral log R versus Peak Particle Velocity log PPV para las curvas de los datos originales, primera y segunda inversión.	45
A.1.	Distribución Espacial de las Estaciones Originales, Estaciones Usadas y Eventos dados para el estudio, en coordenadas mina Este y Norte. . . .	51
A.2.	Distribución Espacial de las Estaciones Usadas para el estudio, en coordenadas mina Este y Norte.	52
A.3.	Correlación PPV Original versus PPV recalculado tras la primera inversión.	52
A.4.	Correlación PPV Original versus PPV recalculado tras la segunda inversión.	53
A.5.	Correlación entre los PPV resultantes de las dos inversiones.	53

Capítulo 1

Introducción

La necesidad de monitorear digital y regularmente minas subterráneas alrededor del mundo, data de varios años atrás. Esto con la finalidad de comprender la manera en que el macizo rocoso responde a los procesos mineros. Alcanzar tal objetivo mencionado es una herramienta fundamental de prevención, control y alerta ante el peligro sísmico, el cual se manifiesta en inestabilidades de la roca que resultan en daños que pueden afectar a los trabajadores o interferir la producción.

La minería no es un proceso espontáneo (*Mendecki, 2018*). Al inducir estrés sobre una roca en determinado tiempo, lugar y con cierta velocidad de avance mediante métodos de extracción como el Panel Caving, se produce actividad muy variable que difiere altamente del movimiento de tipo tectónico. En este sentido, manejar correctamente la información sísmica que otorgan los sensores de las redes instaladas para su interpretación es esencial.

Si hablamos en términos probabilísticos, el uso previo que se le ha dado a los datos obtenidos en sistemas sísmicos giraba en torno al denominado riesgo sísmico, es decir, la probabilidad de ocurrencia de un valor específico de magnitud o aceleración del suelo asociada con un evento sísmico, la cual será igual o mayor a cierto nivel durante un período de tiempo. Se acostumbra conseguir una estimación temporal de riesgo sísmico a partir de la *Ley de Gutenberg Richter* y de un conteo del número de eventos con magnitudes mayores a cierto mínimo establecido.

Sin embargo, con el correr de los años y los avances dentro del área, aparecieron nuevas metodologías con el mismo objetivo, pero dejando atrás problemas como las imprecisiones asociadas a parámetros que no eran considerados. El *Ground*

Motion Hazard gira en torno al máximo movimiento del suelo que puede ser experimentado en un espacio dado, el cual es controlado por la máxima velocidad en la fuente, la interacción de la radiación desde diferentes partes de la misma y las ondas de viaje, además de los efectos de sitio (*Mendecki, 2018*).

La metodología que permite caracterizar este hazard está basado en los principios descritos por Mendecki en la guía “*Mine Seismology Reference Book (2016)*”, la cual abarca y describe a detalle una serie de fundamentales pasos, pero que puntualmente para este estudio, solo nos enfocaremos en uno de ellos.

Conocida como *Ground Motion Prediction Equation (GMPE)*, corresponde a una relación que nos entrega el valor esperado de velocidad máxima del suelo (*Peak Ground Velocity*) o *PGV*, en función de la magnitud sísmica y la distancia hipocentral, siendo su principal utilidad, predecir movimiento del suelo causado por grandes eventos que puedan presentarse en el futuro, basado en el registro de ground motion de sismos de mucho menor magnitud.

1.1. Antecedentes

Codelco, abreviación para Corporación Nacional del Cobre de Chile, es una empresa estatal cuyo rubro es la explotación, procesamiento y comercialización de productos mineros cupríferos, destacando como una de la más grandes alrededor del mundo, siendo pionero en producción de cobre. Prueba de esto es que Codelco concentra alrededor del 7% de las reservas globales de cobre contenidas en grandes yacimientos, además de ser el segundo mayor productor de molibdeno.

Sus operaciones unificadas bajo este nombre comenzaron en abril de 1976. Con casa matriz en Santiago, cuentan con otros siete centros de trabajo o divisiones, ya sean instalaciones o yacimientos de mineral, los cuales se ubican entre las regiones de Antofagasta hasta la región de O’Higgins. Estas son: Chuquicamata, Radomiro Tomic, Ministro Hales, Salvador, Andina, Ventanas, Gabriela Mistral y El Teniente. Además, participa en importantes operaciones mineras como Agua de la Falda y El Abra, entre otras.

1.1.1. División El Teniente

Considerado el yacimiento de cobre subterráneo más grande del mundo, El Teniente, ubicado en la comuna de Machalí, Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, a 50 kilómetros de la ciudad de Rancagua, al nivel de la latitud 34°S y a una altura de 2300 metros sobre el nivel del mar en la zona central de la Cordillera de los Andes. Su formación es el resultado de la sucesiva intrusión de cuerpos félsicos y los procesos de alteración hidrotermal asociados, estos apostados en rocas volcánicas del Mioceno.

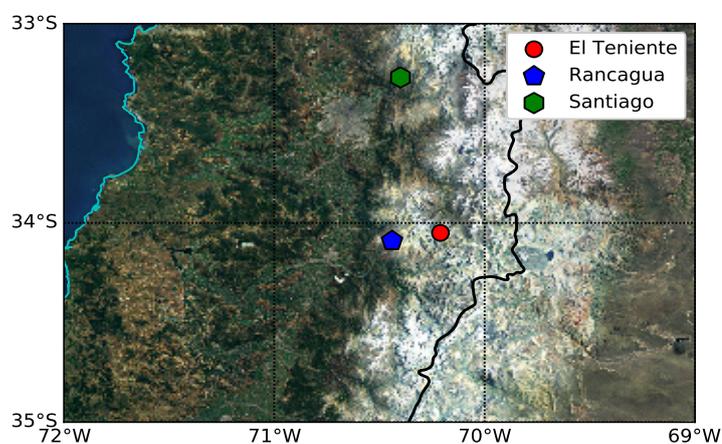


Figura 1.1: Ubicación Geográfica de Codelco División El Teniente.

Comenzó su historia de explotación industrial durante 1906 por las partes más altas de la cordillera y continúa hasta la actualidad contando con más de 4500 kilómetros en galerías subterráneas construidas y una producción en el último año de unas 440.000 toneladas métricas de cobre fino.

La División El Teniente es uno de los complejos minero-metalúrgicos pertenecientes a Codelco, la cual considera entre sus activos principales esta mina subterránea, la cual cuenta con diversos sectores de explotación rodeando la Pipa Braden, además de zonas productivas e infraestructura fundamentales para procesos de concentración y fundición de cobre y subproductos que se comercializan. Cuentan con recursos geológicos de 100 millones de toneladas y reservas de 35 millones de toneladas.

Las unidades productivas con las que cuentan actualmente son: Esmeralda, Diablo Regimiento, Pipa Norte, Andes Sur, Dacita, Reservas Norte, Teniente 4 Sur y

Pilar Norte. Además, desde 2012 Rajo Sur funciona como la primera explotación en superficie en la historia del yacimiento y se trabaja también en el proyecto del Nuevo Nivel Mina.

El yacimiento posee una mineralización que consiste esencialmente de molibdenita, calcopirita y bornita, los cuales se distribuyen en vetillas formando un enrejado conocido como stockwork o polidireccional, lo cual deriva en rocas con diferente grado de alteración.

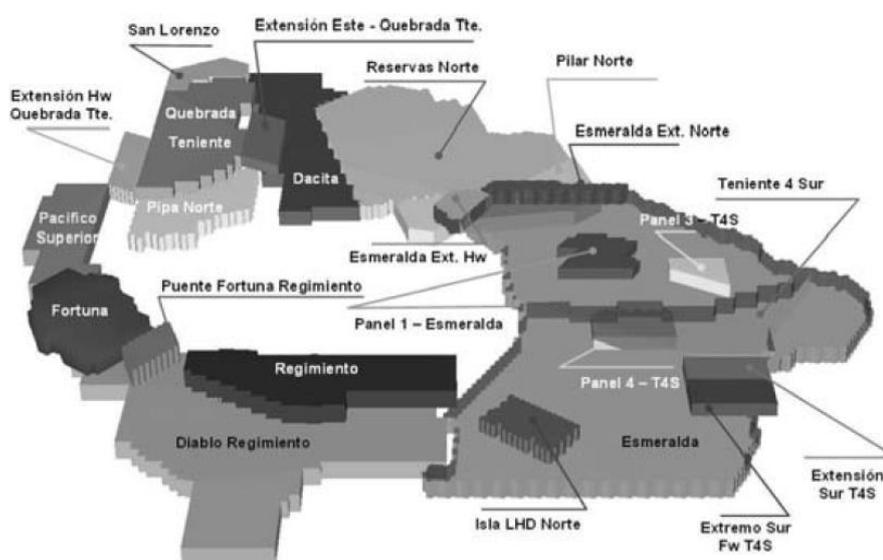


Figura 1.2: Sectores de Producción Mina El Teniente (Díaz y Morales,2008).

1.1.2. Generalidades de Pilar Norte

Pilar Norte es un sector perteneciente a Codelco División El Teniente, localizada al norte de la mina, formando un pilar entre los frentes socavados de sectores adyacentes Esmeralda y Reservas Norte, el cual existe dentro de un entorno de alto estrés, que puede provocar daños a los pilares del nivel de producción del macizo rocoso. Pilar Norte y Reservas Norte están localizados a 90 metros sobre el nivel de Esmeralda. El nivel de producción (UCL) de Pilar Norte se ubica en la cota 2120 m.s.n.m.

Las excavaciones de esta área comenzaron en el año 2009 y se planeó que la producción comenzara el siguiente año. Con una proyección de vida útil de 7 años, produciendo una cantidad de productos de 17000 toneladas por día (Muñoz et

al.,2018). Se le reconoce como el primer proyecto minero tele-comandado desde la ciudad de Rancagua a una distancia de más de 50 kilómetros.

Tuvo un período no operacional de aproximadamente dos años debido a complejidades geomecánicas, las cuales lamentablemente se manifestaron en daños a causa de eyección de material por el fenómeno de estallido de roca. Este material expulsado presenta, por cierto, un gran problema para la seguridad de los operadores y la continuidad normal de las operaciones mineras.

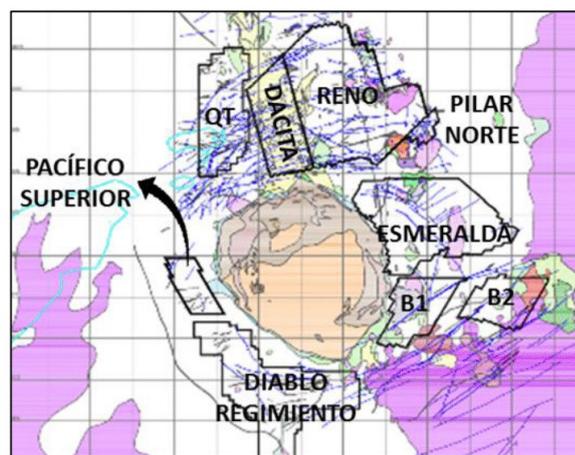


Figura 1.3: Ubicación Sector Pilar Norte (Muñoz et al.,2018).

1.2. Método de Explotación: Hundimiento de Paneles

Durante el último tiempo y como consecuencia de la existencia de sectores productivos a mayor profundidad, cambios en las propiedades mecánicas y físicas de la roca, además de la explotación de material del tipo primario, ha derivado en la mecanización de las labores mineras. En este sentido, la mina El Teniente se inclinó por la utilización de la metodología de Panel Caving, la cual destaca precisamente por ser mecanizada, además de altamente eficiente con bajos costos, convirtiéndose hoy en el método de extracción más utilizado en el área minera. El desarrollo y el conocimiento adquirido con el paso del tiempo a través de este procedimiento, ha permitido reducir considerablemente el grado de daño producido en los niveles donde se lleva a cabo la socavación del material, así como la producción de los peligrosos estallidos de roca.

El Panel Caving, consiste en la ejecución de un conjunto de operaciones mineras que tienen el objetivo de producir el hundimiento del cuerpo mineralizado, bajo condiciones más o menos controladas, esto, mediante cortes basales de un panel, los cuales hacen perder el punto de apoyo del macizo rocoso. El mineral se fractura y se rompe por cuenta propia debido a un cambio en las tensiones internas de la roca, además de los efectos de la gravedad. Para llevar a cabo este procedimiento, se requiere socavación mediante un mínimo de perforación y tronadura. El frente de avance del quiebre se conoce como frente de hundimiento o de socavación y define el ingreso de área a producción, siendo planificado de forma coordinada a medida que se va agotando el sector. Como se utiliza para explotar roca del tipo primaria, menos fracturada y más competente que la secundaria, muestra una fragmentación gruesa.

El método deriva del sistema de hundimiento por bloques o Block Caving, sin embargo, la diferencia entre ambos radica en que el último es un procedimiento de explotación por bloques, entre los cuales se puede ir alternando sin mayor problema. En cambio, en el hundimiento por paneles, donde el material se extrae por filas que abarcan varios de estos bloques, no existe la posibilidad de trasladarse de unos a otros. En su lugar, se va avanzando en conjunto con el frente de hundimiento. Hablamos más bien de un hundimiento progresivo que se origina de una fractura inicial. El material, como ya se mencionó antes, cae por acción de tensiones internas y fuerzas externas. La extracción del producto del desplome se extrae mediante bateas y zanjas, lo que a su vez genera vacío en el cuerpo mineralizado. El fracturamiento sucesivo de la roca termina con un desplome completo del panel. El diseño minero general que posee este método se desarrolla en niveles, los cuales se detallan a continuación:

- **Nivel de Hundimiento o Socavación (UCL):** Contiene las galerías de socavación, las cuales son paralelas entre sí. Se encuentra ubicado a una cota de 2120 m.s.n.m.
- **Nivel de Producción (NP):** Ubicado bajo el nivel de hundimiento a una cota de 2110 m.s.n.m. Lo conforman galerías que también son paralelas entre sí denominadas calles. Estas últimas poseen entradas a los puntos de extracción y bateas, además corresponden a las vías a través de las cuales se mueven los equipos de LHD. Estos equipos poseen un área de accesibilidad

para extraer el mineral de las bateas, conocidas como zanjas, y, así, vaciarlo posteriormente a un pique de traspaso.

- **Sub-Nivel de Ventilación (SNV):** En este nivel se encuentran galerías para la inyección y extracción de aire, además desde este lugar nacen chimeneas o piques que se conectan a los diferentes niveles. Lo encontramos en la cota a 2050 m.s.n.m.
- **Nivel de Control (NC):** Cumple funciones destinadas a recibir y reducir el tamaño del material acarreado desde el Nivel de Producción. Las cámaras de picado controlan por medio de parrillas el tamaño del mineral, antes de continuar su camino a lo largo de los piques de traspaso de material. Si la granulometría no traspasa la parrilla de control, se somete a reducción con un martillo picador.
- **Nivel de Transporte (NT):** Corresponde al conjunto de galerías que cumplen la función de carga, transporte y buzones de descarga para sacar posteriormente el material a la superficie. Se encuentra alrededor de la cota a 2080 m.s.n.m.

Tras el desarrollo de los niveles descritos anteriormente es que se puede dar comienzo al proceso de explotación, iniciando con las tronaduras en el Nivel de Hundimiento y continuando progresivamente pasando el material de un nivel a otro hasta alcanzar el Nivel de Transporte.

1.2.1. Fracturamiento Hidráulico

Pre-acondicionar el terreno a través del proceso de fracturación hidráulica ha ganado gran interés en el último tiempo en el sector de la minería imponiéndose como una tendencia global.

El objetivo que persigue, es lograr la intervención del macizo rocoso previo a su explotación y de esta manera, permitir eficiencia en la manipulación posterior del material y un acceso aún más sencillo. Aplicar la fracturación hidráulica requiere básicamente conocer la ubicación de las vetas del mineral y el terreno, para lograr posicionar de manera eficiente el sistema de bolsas inflables o packers a través de los cuales se inyectará líquido a alta presión en el área determinada, esto mediante perforaciones en zonas pre determinadas y a profundidades funcionales para la

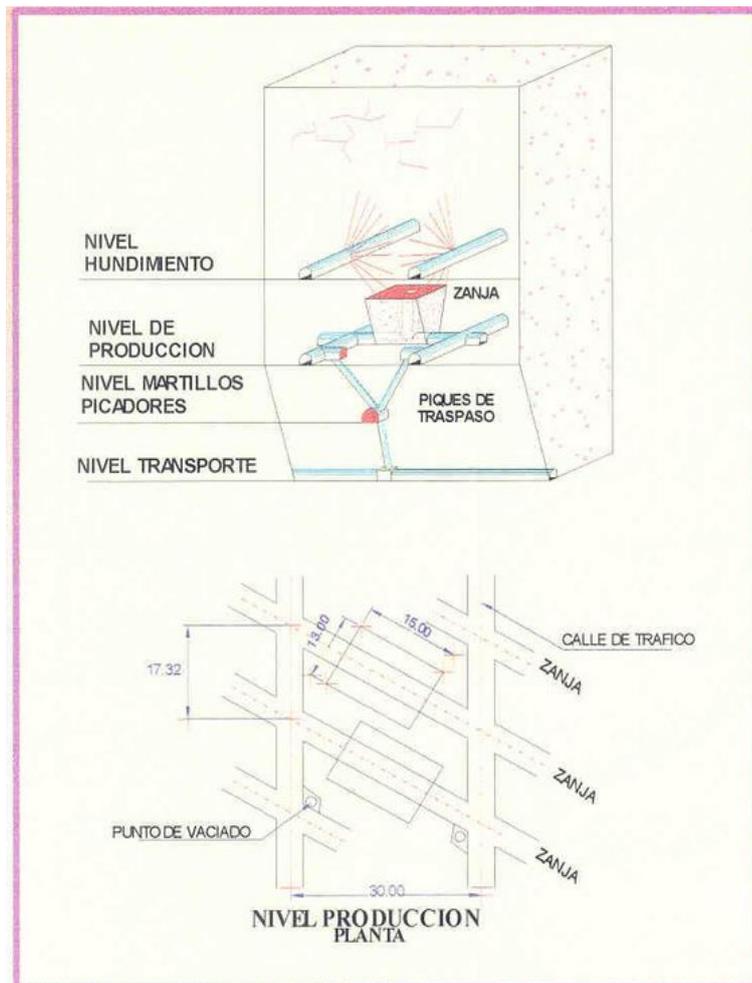


Figura 1.4: Método de Explotación Panel Caving y Malla de Extracción Mina El Teniente (mineriyayconstrucci0.wixsite.com)

mina donde se está trabajando. Los packers se instalan aislando una sección de una perforación, de tal manera que se pueda inyectar a través de un tubo un líquido a alta presión, el cual también se regula bajo las condiciones del yacimiento. Esto, para que se induzca un aumento local de los esfuerzos al punto de superar la resistencia efectiva de la roca.

Con este procedimiento se crean fracturas desde el punto de aplicación, las cuales pueden ser múltiples mientras la inyección del fluido y la presión ejercida sean continuas. Se produce el debilitamiento del macizo, el cual facilitara el proceso posterior de Panel Caving en el mismo. El fracturamiento hidráulico se transforma en un percusor para la ocurrencia de actividad sísmica en zonas de mayor debilidad, como lo son las fallas pre-existentes. En este proceso recae la responsabilidad de transformar la roca primaria, altamente competente, en un macizo adecuado para la explotación por hundimiento de paneles. Cumple en definitiva la función de mejorar la fragmentación del material y su flujo hacia puntos de extracción, resultando manejable también para los equipos de producción.

Es beneficioso en muchos sentidos, ya que, en primer lugar, se reduce el uso de explosivos, lo que conlleva al decaimiento de la sismicidad y esto se traduce en mayor seguridad para los trabajadores de las faenas mineras, reduciendo la probabilidad de ocurrencia de estallido de roca. Adicionalmente, es un procedimiento no contaminante que ahorra el consumo de energía y también, baja los costos del proceso de producción.

En 2005 se utiliza por primera vez este tipo de pre acondicionamiento en la mina El Teniente, en el sector conocido como Diablo Regimiento.

1.3. Sismicidad Inducida por Actividad Minera

Un evento que ocurre dentro del yacimiento se define como una deformación repentina del medio sólido. Esto libera energía en forma de ondas mecánicas. En el caso de los eventos inducidos de mayor magnitud, los sismos son la respuesta normal del macizo rocoso ante los cambios de esfuerzo que experimenta a causa de la actividad minera. A partir de lo anterior, como la sismicidad depende de las operaciones mineras, como el Panel Caving, se dice variable en el tiempo. Se inducen diversas formas de rupturas que liberan cierta cantidad de energía al medio como una forma de reequilibrarse. Además, la interacción espacial de

las estructuras geológicas y los contactos litológicos también crea un entorno propicio para la sismicidad inducida. En general, las magnitudes de los eventos varían entre -2 y 2 en escala magnitud momento, los cuales son registrados por estaciones ubicadas en diferentes niveles de la mina.

Resulta bastante conveniente trabajar con la data obtenida gracias a este proceso, parámetros como, por ejemplo, el hipocentro, energía y momento sísmico, nos pueden otorgar un mejor entendimiento del comportamiento de las áreas explotadas. Si consideramos estos valores en una ventana de tiempo histórica podríamos notar variaciones, que ante un cambio repentino nos ayudarían a prevenir y tomar medidas para reducir el peligro sísmico, es decir, que la probabilidad de ocurrencia de un evento de gran magnitud sea prevista.

Se torna fundamental el adecuado control del sistema, manejo y administración óptima de las causas y efectos de la actividad sísmica inducida por la minería, identificando potenciales daños en las labores mineras por eventos sísmicos significantes, ya sea un sismo o tronadura (de socavación o producción), que libere una cantidad de energía considerable para producir daño en los trabajadores, infraestructuras o maquinarias.

Evitar grandes eventos sísmicos como, por ejemplo, expulsiones violentas de material rocoso dentro de la mina, como el estallido de roca 2.1 magnitud momento del 12 de abril de 2020 en Pilar Norte es vital, por lo que se debe ser persistente en el monitoreo y análisis de los datos obtenidos gracias a los equipos instalados a lo largo y ancho del yacimiento.

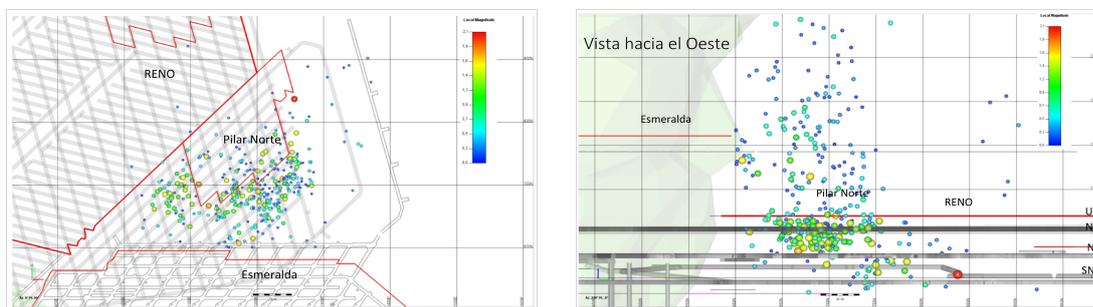


Figura 1.5: Sismicidad en sector Pilar Norte, Mina El Teniente entre enero 2018 y octubre 2021. Vista desde arriba (izquierda) y vista en profundidad (derecha). Facilitada por Patricio Jorquiera.

1.4. Red de Monitoreo Sísmico

Debido a que pueden desencadenarse fenómenos desafortunados dentro de las áreas de trabajo, un cuidadoso monitoreo sísmico es esencial dentro del rubro minero.

Ante la posibilidad de instalar un sistema que permita esta constante supervisión a través de la instalación de sensores, un sistema de obtención de señales y procesamiento de datos, se logra determinar parámetros que son fundamentales para el entendimiento del comportamiento del macizo rocoso.

A pesar de que realizar un análisis pueda sonar bastante complejo, esta sismicidad generada puede resumirse en la combinación de tres factores: las estructuras geológicas presentes, el cambio de los esfuerzos inducidos y el método de explotación minera.

En cuanto al diseño de la red sísmica para el área minera el factor fundamental es definir el volumen del macizo, donde su condición de equilibrio será la perturbación previamente planificada por el personal minero calificado el cual, generará la actividad. La idea es que el arreglo de sensores se instale en el volumen dicho y en los alrededores de este para conseguir registros adecuados.

Una red sísmica se puede caracterizar en tres aspectos generales, estos son, la capacidad de captura, proceso y almacenamiento de datos, las particularidades en los errores de estimación de parámetros sísmicos, como, por ejemplo, la localización de los eventos y probablemente, el punto más importante, la sensibilidad, la cual se determina en base a la magnitud mínima registrada por el sistema de sensores. Es sobre esta magnitud que se registrarán todos los eventos con suficiente tasa entre señal y ruido. Depende principalmente de la clase de sensor instalado, la distribución espacial y distanciamiento entre estos instrumentos.

Es importante mencionar también que para mantener la sensibilidad de la red deben conservarse la cantidad de estaciones en operación, de lo contrario, habría un cambio en la magnitud mínima.

A continuación, se describen las características principales de los tipos de sensores que conforman típicamente una red sísmica:

- **Geófonos:** Corresponden a un sistema electro-mecánico que permite

convertir el movimiento de partículas del macizo en una señal eléctrica, la cual es proporcional a la velocidad de partícula del medio. Normalmente los componen tres bobinas que corresponden a las tres componentes, Este, Norte y la Vertical, esto en el caso de un geófono triaxial, también se utilizan uniaxiales. Utilizados para eventos de magnitudes más altas, señales en frecuencias mayores que la de resonancia del sistema (entre 400 y 1000 Hz) y para redes con mayor dimensión.

- **Acelerómetros:** Su funcionamiento se basa en un efecto piezoeléctrico generado por masas de pequeño tamaño, las cuales, aceleradas por el movimiento de partículas en el medio comprimen cristales y causan una señal eléctrica. Esta señal se ajusta para que sea proporcional a la aceleración de las partículas señaladas. Utilizados para eventos de magnitudes menores, frecuencias menores a la de resonancia del sistema (mínima de 1 Hz) y redes con dimensiones más pequeñas. Como su sensibilidad con la velocidad del suelo o la radiación de energía crece con la frecuencia, permite a los eventos más pequeños ser mejor detectados que por un geófono de características similares.

Deben considerarse diferentes factores al implementar estos instrumentos en un arreglo de sensores, dependiendo a que distancia se instalen el uno del otro y las características del macizo rocoso como sus velocidades de atenuación o propagación, los costos de instalación, entre otros.

1.4.1. Sistema Sísmico Mina El Teniente

La historia del monitoreo sísmico en la Mina El Teniente comienza en 1982, tras esto y con el correr de los años fue que adquirió una mayor cobertura. De todas formas, para 1992 ya se contaba con un sistema bastante completo, tanto a nivel local, con dos sistemas micro sísmicos análogos, en el sector Teniente Sub-6 y Teniente 4-Sur respectivamente. Esto con 30 acelerómetros uniaxiales en el primer caso y 25 acelerómetros uniaxiales para el segundo. Las redes se instalaban en el entorno frente al área de socavación de cada sector. Para la red global, un sistema macro sísmico completamente digital cubría el total de la mina. Desde aquel año y hasta aproximadamente 1998, este sistema incluía 23 estaciones sísmicas remotas

equipadas con geófonos triaxiales ubicados desde la superficie en perforaciones a una profundidad de 7 a 8 metros, los cuales son cementados para garantizar su acople con el macizo rocoso. Las señales registradas por los sensores mencionados eran procesados por unidades electrónicas próximas y posteriormente iban a un centro de recepción en el nivel Teniente Sub-6.

Dentro del período anterior el monitoreo sísmico fue una herramienta fundamental, ya que gracias a los eventos significativos y data recolectada para su posterior análisis, se logró modificar y ajustar algunos parámetros de producción se lograron cambiar las características de la sismicidad inducida produciendo menores daños a futuro.

Actualmente, la Mina El Teniente cuenta con una red de alrededor de 121 estaciones, divididas en 6 redes con diferente densidad de estaciones y diversidad de tipo de sensor en cada una de ellas. Dentro de estas encontramos, la Red del Nuevo Nivel Mina, la cual destaca por concentrar mayor cantidad de estaciones que las demás, le siguen en número la Red Esmeralda, Reno-Dacita, Pilar Norte, Diablo Regimiento y, por último, Recursos Norte. Particularmente, la red del sector Pilar Norte cuenta con 15 estaciones, distribuidas en los Niveles Teniente- 8, Teniente-7, Nivel de Producción Esmeralda, Nivel de Hundimiento, y Nivel de Transporte Intermedio. En cuanto a los sensores que se encuentran en estas estaciones encontramos algunos acelerómetros triaxiales de 2.3 Hz, geófonos uniaxiales y geófonos triaxiales de 4.5 Hz y 14 Hz.

A grandes rasgos, las estaciones que se encuentran distribuidas por toda la mina cuentan con algún tipo de sensor asociado, como los antes mencionados, además están provistos de toda la electrónica necesaria como fuentes de energía adicional y sistema de red. Es la señal ya digitalizada, ya sea por algún elemento de la estación o cualidades del sensor utilizado, la que viaja a través del cableado hacia el dispositivo central ubicado en el llamado Barrio Cívico. En primera instancia, la información es recibida por un equipo de comunicación a través de un módem de entrada, esto para cada estación existente. Luego de este paso a través de la red computacional local comunica con el servidor principal del sistema. Es aquí donde residen los softwares necesarios para capturar, procesar parámetros y almacenar datos.

Por último, destacar que gracias a la iniciativa de la Superintendencia de

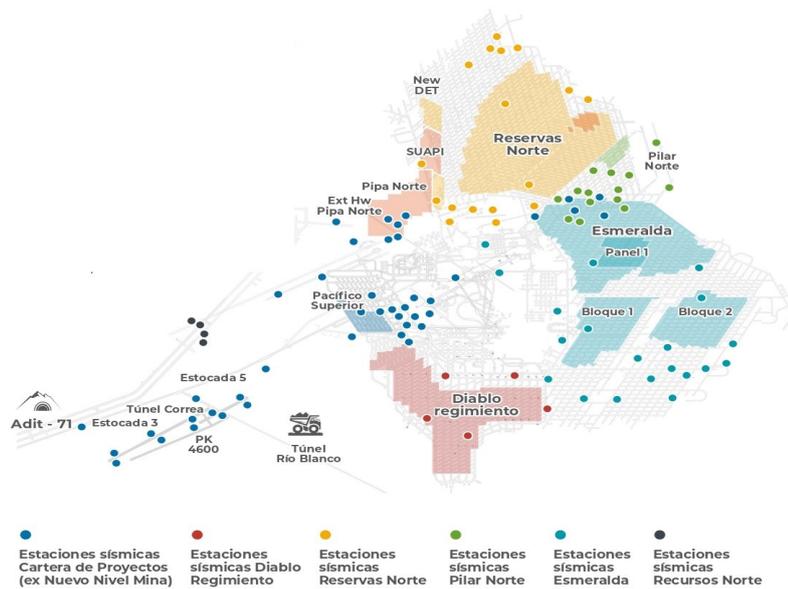


Figura 1.6: Sistema Sísmico Mina El Teniente. Revista El Teniente N°2466, Enero 2021.

Geomecánica Operacional de la Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo (GRMD) se actualizó una plataforma donde puede monitorearse las condiciones del macizo rocoso en todo momento para los trabajadores antes de adentrarse en sus labores, fundamental para el ingreso seguro a producción, convirtiéndose con total mérito en uno de los sistemas más completos a nivel mundial en cuanto a monitoreo sísmico al interior mina se trata.

1.5. Método de Ground Motion

Estimar el riesgo sísmico es vital en diversos ambientes que requieren un método para contar con la infraestructura adecuada y resistente ante la constante actividad sísmica que se presenta, por ejemplo, como consecuencia de la minería. En el pasado, la mayoría de los análisis se centraron principalmente en calcular medidas de intensidades escalares, como se da con el uso de la *Ley de Gutenberg- Richter*. Sin embargo, con el tiempo creció la necesidad de tener una representación más bien histórica-temporal del movimiento del suelo, además de las magnitudes. Aquí es donde entra la metodología que incluye a las *Ecuaciones de Predicción de Movimiento del Suelo (GMPE)*.

1.5.1. Ley de Gutenberg-Richter

Corresponde a una ley de escalamiento que relaciona el número de eventos sísmicos con su magnitud. Establece que, en el caso de presentarse una disminución en la ocurrencia de eventos, esto genera un escenario donde la magnitud del sismo que pudiera ocurrir sea mayor debido a acumulación de energía sísmica. Al contrario, si aumenta la frecuencia de sismos debería disminuir la magnitud del evento esperado, ya que la energía es liberada de forma continua. La ecuación detrás de esta definición es la siguiente:

$$\log N = a - bM \quad (1.1)$$

Donde M corresponde a la magnitud y N al número de eventos de magnitud igual o mayor a M . Mientras que a es una constante relacionada con el nivel de sismicidad de una región determinada, la cual representa el número de eventos con magnitud mayor o igual a cero y b , que corresponde a la pendiente de la ecuación conocida con el nombre de “valor de b ”. Este último tiene que ver con las características geomecánicas del macizo rocoso, como los esfuerzos, la heterogeneidad de la roca, entre otros. Para el caso particular del uso de este valor en minería, es un indicador general del riesgo sísmico. Como se mencionó en el punto anterior, la sensibilidad de la red se define en base a la magnitud mínima registrada por esta, por ende, puede estimarse a partir de la construcción de una curva de Gutenberg- Richter. Cabe mencionar que valores altos de b indican menor acumulación de esfuerzos, por ende, se esperan eventos de baja magnitud. Esto se traduce en riesgo sísmico menor. Por el contrario, valores bajos de b indican sismos de magnitud elevada, esto por la mayor acumulación de esfuerzos. Esto indica mayor riesgo sísmico.

1.5.2. Ecuación de Predicción de Movimiento del Suelo (GMPE) y Variables Predictoras

Las ecuaciones de predicción de movimiento del suelo (GMPE), conocidas también como relaciones de atenuación, se han convertido en el último tiempo en la herramienta escogida para análisis de riesgo sísmico (*Douglas, 2016*) y esto se ha dado por diferentes razones. Las principales tienen que ver con que la modelación de este tipo de expresiones es confiable, tanto que se puede extrapolar aún más y con cierto grado de confianza. Además, que con conjuntos de datos cada vez más

completos y mejorados ha crecido la utilidad de los modelos, añadiendo incluso una mayor cantidad de variables predictoras fuera de la magnitud y la distancia, siendo las primeras en aparecer al presentarse las primeras relaciones de ground motion.

Tal y como se detalla en el texto *Mine Seismology Reference* (Mendecki,2016), una *Ground Motion Prediction Equation (GMPE)*, nos entrega el valor esperado de un parámetro relacionado con el movimiento del suelo, sea de velocidad (*peak ground velocity*) o de desplazamiento (*cumulative absolute displacement*), los cuales se encuentran en función de la energía, potencia o magnitud sísmica y la distancia. Para este estudio nos enfocaremos en el primero mencionado.

La principal utilidad para este tipo de expresiones, es predecir movimiento del suelo causado por eventos más grandes que podrían ocurrir en un futuro, basado en observaciones de ground motion causado por eventos más pequeños.

Una ecuación de predicción simple para el *peak ground velocity* sería de la siguiente forma (Mendecki,2016):

$$PGV = c \cdot P^{c_P} (R + c_l \cdot P^{1/3})^{-c_R} \quad (1.2)$$

O también puede reescribirse en su forma logarítmica como:

$$\log PGV = c_P \log P - c_R \log (c_l P^{1/3} + R) + \log c \quad (1.3)$$

Para las expresiones anteriores, P corresponde a la potencia sísmica y R la distancia. Por otro lado, c_P corresponde al parámetro que depende de la magnitud, c_R se relaciona con la tasa de atenuación geométrica, c_l es integrado para amplificar a cortas distancias y c , es un parámetro libre.

Si analizamos algunas partes de la ecuación anterior más a detalle, $c_P \log P$ es un término consistente con la definición de magnitud de un evento como una medida logarítmica de la amplitud del movimiento del suelo. Por otro lado, $-c_R \log R$ describe como se propaga el frente de onda sísmico mientras se aleja de la fuente, además representa en parte, la atenuación a causa de la inelasticidad y dispersión del medio. Por último, $c_l P^{1/3}$ es el valor que modula el ground motion a distancias pequeñas controlando la saturación.

Es importante recalcar que la selección de ecuaciones adecuadas para una zona de

interés es de gran importancia, un análisis de riesgo sísmico debe considerar todas las ecuaciones potencialmente aplicables a la región (*Tsekentis et. al, 2009*).

Algunos antecedentes relacionados con el desarrollo y uso de este tipo de expresiones en la Mina El Teniente o bien más acotado a la zona de estudio se pueden encontrar aunque escasos en la literatura. Por destacar, *Kaiser et al. (1996)* proponía una ecuación inspirada en (1), sin embargo, ésta contemplaba el término relacionado con la atenuación como $c_R = 1$ y anular c_l de la misma ($c_l = 0$). De esta manera, se obtenía una ecuación con la forma de $PGV = c \cdot P^{c_P} / R$. Esto, se puede reescribir de la forma:

$$\log PGV = c_P \log P - \log R + \log C \quad (1.4)$$

Los valores que se recomiendan en este trabajo son $c_P = 0,5$ y $c = 0,25$. Podemos en este punto tomar en cuenta también que $M = \mu P$, con M magnitud de momento. Como velocidad máxima (PGV) se considera el peak particle velocity (PPV).

No se encontraron trabajos más recientes que propongan ecuaciones predictoras para la División. Las últimas expresiones basadas en el uso del PPV como variable de velocidad máxima, se adjudican al trabajo de Potvin y Wesseloo (2013), donde integran variables como el radio de la fuente y la magnitud local. Tiene inspiración en el trabajo de Kaiser et al. (1996) y recomienda valores de C guiados a propósitos de diseño.

Actualmente, Codelco División El Teniente y particularmente el Área Sísmica, por recomendación del *Institute Mine Seismology (IMS)* cuentan y esperan aplicar la siguiente ecuación de ground motion:

$$\log PPV = c_1 \cdot M - c_2 \cdot \log R + c_3 \quad (1.5)$$

En la expresión anterior, PPV corresponde al *peak particle velocity*, M a magnitud momento o Hanks-Kanamori y R a la distancia hipocentral. Mientras que, c_1 es el parámetro que depende de la magnitud, c_2 se relaciona con la atenuación geométrica y c_3 es el término libre.

Si hacemos un paralelo con la ecuación 1.3, se considera que el término que se integra para amplificar a distancias cortas, c_l se supone igual a cero, lo que se

traduce en que el *PPV* es matemáticamente infinito en el origen, por ende, se propaga desde una fuente puntual. El foco puntual es una buena aproximación cuando las dimensiones de la fuente son pequeñas comparadas con la distancia al punto de observación y la longitud de onda de la señal analizada.

Las razones para las variables predictoras, tanto dependientes e independientes de la ecuación 1.5 se detallan en los siguientes párrafos:

- **Peak Particle Velocity (PPV):**

En la mayoría de los casos, los daños por el fenómeno de estallido de roca ocurren lejos de las locaciones y a diferentes distancias de la ubicación del hipocentro de un gran evento. Esto, debido a factores que tienen que ver con el patrón de radiación y la atenuación geométrica, además de que la intensidad de la onda sísmica se reduce exponencialmente con la distancia desde la fuente (*Potvin et. al, 2013*).

Para resolver y capturar este fenómeno con un solo parámetro se utiliza el llamado *Peak Particle Velocity* o *PPV*, el cual es empleado con fines de diseño en la minería, ya que este demuestra tener una mejor correlación con el daño (*McGarr, 1983*) si lo comparamos con otros parámetros relacionados con la aceleración, como el *Peak Particle Acceleration*.

Como ya se mencionó en el apartado anterior, el *PPV* es usado con un parámetro de diseño, el cual captura la severidad de la influencia de eventos sísmicos a cierta distancia. Sin embargo, como su aplicación es una metodología simplificada, puede producir resultados mixtos, como, por ejemplo, bajos valores de *PPV* creando grandes cantidades de daño o altos *PPV* que no resultan en daños.

De todas formas, la estimación precisa del movimiento del suelo o *PPV* es importante para el diseño de soporte dinámico de rocas y el análisis de daños por estallido de roca delineando su correspondiente radio de influencia.

- **Magnitud momento o Hanks-Kanamori:**

Aunque el concepto de magnitud ya esté asociado con energía radiada por un evento, es importante considerar diversos factores como las características instrumentales o la caracterización de la ruptura, así que sería más adecuado contar con una descripción cualitativa del evento. En este sentido, optando

por una relación que se asocie directamente a un parámetro de la fuente con significado físico, se establece una magnitud que se estima a partir del momento sísmico escalar (M_o), el cual a su vez es proporcional al desplazamiento promedio de la zona de ruptura y al área de la misma.

Se representa por la ecuación a continuación:

$$M_w = \frac{2}{3} \log M_o - 10,73 \quad (1.6)$$

Esto en unidades de $[dyn - cm]$, donde $M_o = \mu \cdot A \cdot \bar{D}$, siendo μ el módulo de rigidez o cizalle, A la superficie de ruptura y \bar{D} el desplazamiento promedio en el área de ruptura.

Para los eventos sísmicos registrados por el sistema sísmico de la Mina El Teniente, se utiliza como magnitud local la magnitud momento:

$$M_L = M_w = \frac{2}{3} \log M_o - 6,01 \quad (1.7)$$

En unidades de $[Nm]$. M_o el momento sísmico.

Actualmente es muy utilizada y su principal ventaja es que no se satura a diferencia de otras escalas, es independiente del tipo de instrumento utilizado y, además refleja bastante bien y por definición el tamaño de la ruptura. Por otro lado, posee desventajas como que el cálculo no es tan intuitivo ni inmediato y, además, esta escala no refleja la energía elástica que irradia la fuente, ya que el momento sísmico se calcula para una caída de esfuerzos constante.

- **Distancia Hipocentral:**

Como ya sabemos, esto se define como la distancia calculada entre el hipocentro sísmico, esto es la ubicación del foco al interior de la Tierra donde inicia la ruptura de la falla con respecto a otro punto que sea considerado, como, por ejemplo, la estación sísmica de registro de los datos.

Se hace uso de la distancia hipocentral debido a que los terremotos que se generan al interior de las minas se consideran pequeños comparados con las distancias involucradas, así que pueden ser considerados como fuentes puntuales, además que las profundidades a las que ocurren estos eventos

tampoco son considerables en tamaño.

Para efectos del presente estudio se utilizan todas las componentes disponibles para cada señal registrada, ya sea Este, Norte o Cota (x,y,z) y los valores se obtienen del cálculo del módulo entre las coordenadas de origen de los eventos y las coordenadas de los sensores ubicados alrededor de un área determinada.

Matemáticamente, puede expresarse de la siguiente forma:

$$R = \sqrt{(X_{est} - X_{ev})^2 + (Y_{est} - Y_{ev})^2 + (Z_{est} - Z_{ev})^2} \quad (1.8)$$

Con R distancia hipocentral en unidad de metros y el sufijo *est* para coordenada de estación y *ev* para coordenada de evento en alguno de los tres ejes.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo General

Calcular mediante alguna metodología de inversión, los parámetros de la relación de ground motion dada, los cuales dependen de las variables predictoras de magnitud momento o Hanks-Kanamori y la distancia hipocentral, utilizando datos de explosiones efectuadas en el sector de Pilar Norte y registradas por diferentes estaciones sísmicas entre enero de 2018 y octubre de 2021. Esto, con la finalidad de discutir una posible aplicación como parte de un uso futuro en análisis probabilístico de riesgo sísmico.

1.6.2. Objetivos Especificos

Con el fin de cumplir con lo anterior, se desea cumplir los siguientes objetivos secundarios:

- Establecer una base de datos sólida dada la información presente.
- Contrastar antecedentes de la zona de estudio, con la teoría de las ecuaciones predictoras de ground motion.

- Aplicar un método claro y sencillo de inversión, para obtener los parámetros.
- Analizar y discutir la aplicación de la relación con sus parámetros ajustados para trabajos futuros en la zona de estudio y alrededores.

Capítulo 2

Metodología

2.1. Área de Estudio

El sector de Pilar Norte representa un caso de historia sísmica no finalizada, ya que su período de producción aún sigue en curso. Nada asegura que la magnitud máxima que se ha registrado hasta ahora no pueda aumentar y más si continúa sometido a condiciones de explotación minera. El proyecto ha sido marcado por una serie de estallidos de roca registrados desde el año 2009, de diversas magnitudes y niveles de daño visible. El fenómeno recién mencionado más una acumulación de altos esfuerzos en el sector, representan un gran problema que disminuye la vida útil del plan original, ya que, por ejemplo, produce deterioro en los pilares del nivel de producción.

Como consecuencia que ya se mencionó en el capítulo anterior, esto ha significado el cese de las actividades en diferentes oportunidades y se ha hecho fundamental buscar estrategias que sustenten las decisiones de crecimiento de Pilar Norte, principalmente enfocándose en métodos que aporten conocimiento del comportamiento del macizo rocoso, el cual se ve perturbado cada que se retoman los trabajos (GRMD-DGD-I-0013-2020).

La geología de este sector es bastante múltiple, con presencia de al menos ocho tipos de litología diferente dentro de una pequeña área. El Complejo Máfico El Teniente (CMET) corresponde a la roca huésped, la cual presenta intrusiones félsicas de Pórfido Diorítico y en su parte central, Pórfido Andesítico, además, se encuentran junto a estos cuerpos, las llamadas brechas ígneas.

En términos de discontinuidades en esta área destaca el sistema de fallas W ($W1, W2, W3, W4$) cuya orientación oscila entre $N8^\circ - 19^\circ E / 70^\circ - 80^\circ E$ (GMRD-DGD-0013-2020). Estas estructuras poseen un espesor promedio de 2cm, con diversos rellenos como Anhidrita, Yeso, Carbonato y Calcopirita, además concentra antecedentes de actividad sísmica con daños asociados a su traza. Ha sido reconocido en los niveles de Hundimiento, Producción y Transporte Intermedio, además es considerado como un sistema de Fallas Mayores con una persistencia máxima de 240 metros.

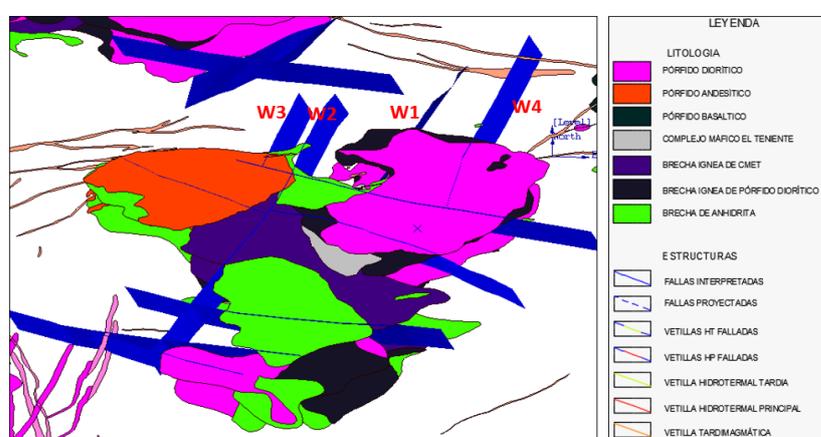


Figura 2.1: Modelo Litológico 3D. Estructuras Mayores e Intermedias de Pilar Norte (Superintendencia Geología, Noviembre 2017).

A nivel geomecánico destaca por su gran complejidad, donde se manifiesta como una alta sismicidad de carácter relevante, la cual se concentra preferentemente en la parte superior y dejando una base con ausencia de esta (*IT-DET-E02-01-07-B*). Eso se ha traducido en una cantidad razonable de estallidos de roca de hasta una magnitud de momento (M_w) de 2.4, como el registrado durante el 24 de diciembre de 2011 en el sector de Pilar Norte (*Malovichko, 2018*). De todas formas, la tendencia de la sismicidad obedece un orden razonable a lo largo de sistemas estructurales existentes y cuerpos litológicos particulares. Históricamente, la mayor tasa de sismicidad ocurrió dentro del período de los años 1999 a 2000, asociado a interacción con cavidades del sector Esmeralda. Tras este período la actividad disminuyó hasta reaparecer entre 2004 y 2006. El rango de magnitudes donde se concentra la mayor cantidad de eventos es de $-0,75$ a $-0,5M_w$.

2.2. Descripción de Estaciones Sísmicas

Como ya se detalló en el capítulo uno, el sistema sísmico de El Teniente provee una buena cobertura del sector de Pilar Norte. Hay unos cuantos sensores instalados en Teniente-8, bajo el nivel del área de interés, además de otros ubicados en agujeros hacia la parte Este del sector (*Malovichko et al., 2018*). Todos los instrumentos de la red están dentro de la línea de visión de las principales áreas sismogénicas en Pilar Norte y, por lo tanto, las ondas registradas tienen llegadas claras de P y S.

Para el presente trabajo se utilizaron todas las estaciones disponibles a lo largo y ancho de la Mina El Teniente, cuyos instrumentos, ya sean acelerómetros o geófonos, registraron las señales de los datos a utilizar, esto entre enero de 2018 y octubre de 2021. La información necesaria de los sensores, es decir, la ID de la estación y coordenadas de la misma, se encuentran en coordenadas mina (x, y, z) y en unidad de metros. Los parámetros anteriores se obtuvieron gracias a un registro histórico que se facilitó para este estudio.

De un total de 348 estaciones con información disponible, las cuales no necesariamente conservan esa cantidad actualmente, sino que han sido aquellas que dentro del período que comprenden los datos usados, conservan información en los registros, así que pueden estar operativas o no.

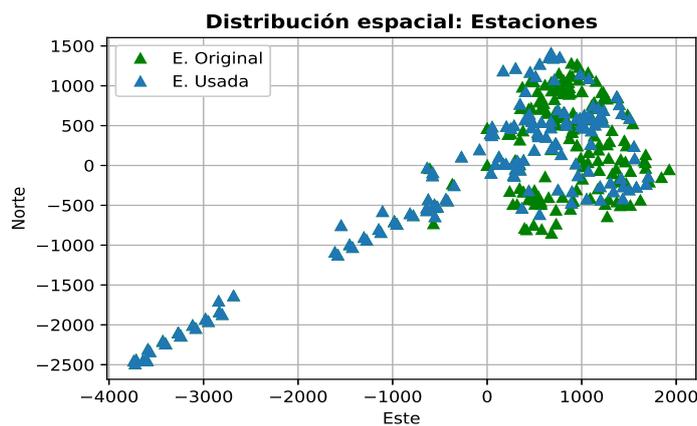


Figura 2.2: Distribución Espacial de las Estaciones Originales (azul) y las Estaciones Utilizadas en el estudio (verde).

Tras contrastar la disponibilidad de estaciones con las que registraron cada uno de los eventos bajo estudio, se encuentra una coincidencia de 151 estaciones. Aquí la cantidad se justifica igual que con las estaciones originales disponibles. Este

número de estaciones no está completamente operativo en la actualidad.

2.3. Procesamiento de Datos

Los datos con los que se trabajó en este estudio corresponden a registros de 58 explosiones por diversas estaciones de todo el sistema sísmico, esto dentro del período de Enero 2018 y Octubre de 2021. La distribución de estos eventos es de 25 explosiones para el año 2018, una cantidad de 20 para el año 2019, solo 4 eventos para el siguiente año 2020 y, por último, 9 quemadas para el período de 2021.

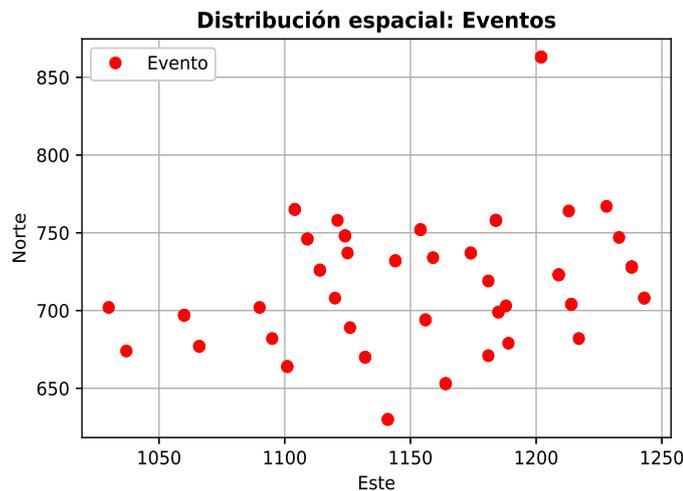


Figura 2.3: Distribución de las explosiones en plano Este- Norte coordenadas mina.

Mencionar que se decidió previamente al tratamiento de datos que solo se utilizarían registros de *explosiones (quemadas)*, esto debido a que a diferencia de los sismos que se perciben a diario, se contaba con su localización exacta. Disponer de una ubicación precisa es fundamental antes de inclinarnos por el uso de una base de datos, sin embargo, en virtud del tiempo disponible para el presente trabajo, se hacía difícil dedicar recursos en relocalizar eventos. Se debe tener en consideración que hablamos de miles de llegadas de terremotos que necesitan ser localizados y procesados sismológicamente cada día.

Los archivos originales de las explosiones se encuentran en formato *CSV* (Valores Separados por Comas) y requirieron ser renombrados mediante un código de *bash*, para tener un orden cronológico de estos y de más fácil lectura al momento

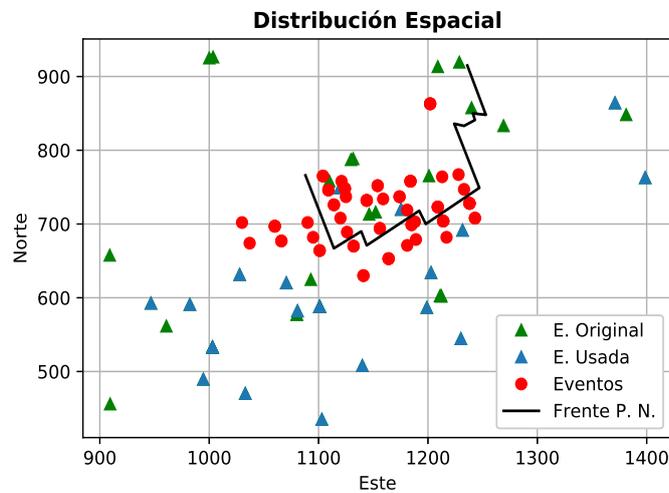


Figura 2.4: Acercamiento a la Distribución Espacial de los eventos sobre el sector de Pilar Norte y de las estaciones originales y usadas.

de extraer información de cada uno de estos registros. De esta manera, los 58 eventos quedaron nombrados con el formato *yyyy/mm/dd*. Además, esta manera de designarlos cumplió una función más adelante en el desarrollo del código, debido a que se requiere el ID de la fecha para hacer un paralelo con el archivo de ubicaciones reales de los eventos, el cual contiene este valor en el mismo formato.

La tabla 2.1 muestra el contenido de las columnas de los archivos de explosiones que se utilizaron. La cantidad de filas de registro en registro es variable, esto debido a que el evento pudo ser captado por más o menos sensores en el momento en que ocurrieron.

De todas maneras, no fue utilizada la información de todas las columnas, solamente la correspondiente a Magnitud Momento [Nm], Amplitud [m/s], *Loc Enabled* (valor 1 ó 0), y, por último, ID de la estación, generándose una lista de matrices con 4 columnas por N filas. Nótese que se necesitaron los valores de *Loc Enabled* para pasar por el primer nivel de limpieza de datos.

Se establecieron dos criterios de descarte de información:

- *Loc Enabled* puede tener solo dos valores, 1 ó 0. Nos quedamos con todos aquellos datos que poseen valor 1, lo que significa que la información de ese registro fue utilizada para calcular parámetros importantes como, por ejemplo, la Amplitud [m/s]. El valor cero implica que no se consideró esa línea de registro para ningún cálculo.

Columna	Variable
1	Index (valor 1)
2	Coordenada mina X [m]
3	Coordenada mina Y [m]
4	Coordenada mina Z [m]
5	Magnitud Momento [Nm]
6	Fecha [mmddyyyy]
7	Distancia Hipocentral [m]
8	Loc Enabled [1 ó 0]
9	Máxima Aceleración [m/s ²]
10	Máxima Amplitud [m/s]
11	Tipo de Sensor (geófono o acelerómetro)
12	Coordenada sensor X [m]
13	Coordenada sensor Y [m]
14	Coordenada sensor Z [m]
15	ID de la estación

Cuadro 2.1: Contenido de los archivos de explosiones.

- Se aplicó también una limpieza a los valores de Amplitud, esto debido a que, si existía algún valor cero dentro de los datos, generaba problema posteriormente al introducirlo en la ecuación de ground motion 1.5 a causa del logaritmo.

Posteriormente, se hizo el cálculo de la distancia hipocentral mediante la ecuación 1.8. Los valores que necesita dicha expresión corresponden a las coordenadas mina Este, Norte y Cota, tanto de las explosiones como de la ubicación de los sensores. Tras resolver este módulo se consiguen los valores de distancia correspondientes a cada uno de los registros en unidad de metros.

En este punto, se consideró quitar los valores extremos de la variable de Amplitud (*PPV*), de modo que los datos se concentren dentro de los límites donde se encuentran la mayoría de ellos y que además, estos valores escapados no afectaran los cálculos que se realizaron después.

La manera de establecer estos límites fue calculando la media y desviación estándar de los peaks de velocidad.

Calculando las expresiones:

$$Lim_{inf} = \overline{PPV} - \sigma_{PPV} \quad (2.1)$$

$$Lim_{sup} = \overline{PPV} + \sigma_{PPV} \quad (2.2)$$

Todos los valores de PPV que se encontraron dentro de estos dos límites, inferior (Lim_{inf}) y superior (Lim_{sup}) se conservaron y el resto de los datos fueron descartados.

2.4. Inversión de la Ecuación de Ground Motion

Previo al desarrollo de la inversión, es importante re ordenar los datos que formarán parte de este procedimiento. Por ende, se establecieron algunos pasos previos:

- Calcular el logaritmo en base 10 de las amplitudes o PPV y el logaritmo negativo en base 10 de las distancias hipocentrales. Tener esto determinado con anterioridad es útil para facilitar la definición posterior de las partes de la inversión, ya que estos términos forman parte de la ecuación 1.5, que es la relación de la que queremos obtener sus parámetros dependientes de la magnitud c_1 , de la distancia c_2 y el término libre c_3 .

Para la relación de movimiento del suelo 1.5, el IMS recomienda valores de $c_1 = 0,98$, $c_2 = 1,8$ y $c_3 = 3,8$, sin embargo, estos debieron ser ajustados a la zona de estudio y por lo mismo, se realizó todo el procedimiento siguiente.

- Con lo anterior establecido, es decir, cada una de las partes de la ecuación 1.5 definidas, se llegó a una instancia donde se decide separar los datos en bloques usando un criterio de distancia hipocentral. Cada 20 metros de distancia se establece una “celda”. Esto quiere decir que todos los datos quedaron “encerrados” en su bloque, dependiendo del valor de la distancia al hipocentro que posean. Puede suceder que dentro de estos bloques exista un valor, varios o ninguno, pero la idea era que solo quedase un valor por rango, así que, en el caso de varios valores presentes en una celda, se hizo el promedio de estos. Para las casillas vacías simplemente se eliminaba ese rango. Quedaron un total de 203 bloques establecidos, en un rango de hasta 6000 metros aproximadamente si consideramos la estación y el evento más lejano registrado.

La razón de proceder a ordenar los datos en estas celdas es debido a que la distribución de los datos previo al reordenamiento no poseía cantidades parejas.

Entonces, renombramos las matrices de la expresión 2.4 de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} f_1(x_1) & f_2(x_1) & \dots & f_m(x_1) \\ f_1(x_2) & f_2(x_2) & \dots & f_m(x_2) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ f_1(x_n) & f_2(x_n) & \dots & f_m(x_n) \end{bmatrix} = A, \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_m \end{bmatrix} = c, \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix} = y$$

Para lo anterior, A corresponde a la matriz de funciones, c a la matriz de coeficientes e y a la matriz de soluciones de la función. Asumiendo independencia lineal entre las columnas de A , se puede usar la pseudoinversa de la misma matriz, para así, conseguir la siguiente relación que permite obtener los valores de los coeficientes c_m .

$$\begin{aligned} Ac &= y \\ A^T Ac &= A^T y \\ c &= (A^T A)^{-1} A^T y \end{aligned} \tag{2.5}$$

Al replicar el proceso anterior a nuestra situación basada en la ecuación 1.5, la cual presenta 3 incógnitas (c_1, c_2, c_3) usadas para obtener n ecuaciones diferentes, más específicamente, una ecuación para cada bloque o celda definido en el punto anterior. El cálculo por inversión de mínimos cuadrados siguiendo los pasos de la expresión 2.5 se repitió dos veces, con la finalidad de conseguir un mejor ajuste de los coeficientes.

Capítulo 3

Resultados y Análisis

3.1. Resultados

Luego de llevar a cabo el proceso de inversión por mínimos cuadrados en dos ocasiones consecutivas en busca de conseguir el mejor ajuste para los coeficientes calculados, se obtuvieron los siguientes valores:

	c_1	c_2	c_3
Referencia	0.98	1.8	3.8
Inversión 1	0.06535	1.47892	0.37116
Inversión 2	0.07097	1.42863	0.20479

Cuadro 3.1: Valores de los parámetros c_1 , c_2 , c_3 de la ecuación 1.5 referenciales, tras la primera inversión y tras una segunda inversión.

La tabla 3.1 incluye en su primera fila los valores de c_1 , c_2 y c_3 sugeridos por el IMS para la ecuación 1.5, los cuales al contrastarlos con lo obtenido de las dos inversiones realizadas es evidente que son diferentes. De todas formas, es importante recordar que trabajamos con solo un parte de la información sísmica (explosiones) que genera el área de estudio. Notar también que si nos enfocamos en los valores obtenidos de la inversión 1 y 2, entre ellas no hay una gran diferencia. De una inversión a otra la tendencia de los coeficientes fue disminuir para el caso de c_2 y c_3 y de aumentar para c_1 . Como ya se mencionó solo se realizaron y nos quedamos solo dos inversiones. esto, en vista de que ajustarla una y otra vez no cambiaba demasiado los valores de los parámetros.

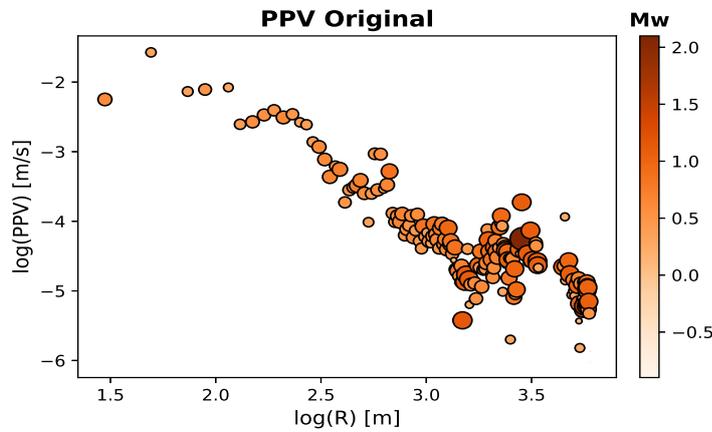


Figura 3.1: Gráfica Logarítmica de la Distancia Hipocentral en metros y Velocidad Máxima (PPV) en metros por segundo para los valores originales previo a la inversión. Además, la barra de colores representa la Magnitud Momento (M_w) en [Nm].

Lo primero que se puede notar en la figura 3.1 es que a pesar de las dispersión, existe una tendencia lineal descendiente de los datos. Este comportamiento parece lógico si recordamos que la expresión en la que está basada la figura es 1.5, una relación de atenuación donde mientras más lejos nos encontremos de la fuente, más decae la energía sísmica con el movimiento del suelo. Además se observa que la distribución de los datos a distancias cortas es discontinua y se concentran a mayores distancias de la fuente de las explosiones (sobre los 600 metros). También sobre estas distancias encontramos los eventos con magnitudes más grandes (sobre $1,5M_w$), en lugares cercanos a la fuente las magnitudes no superan a $1,0M_w$.

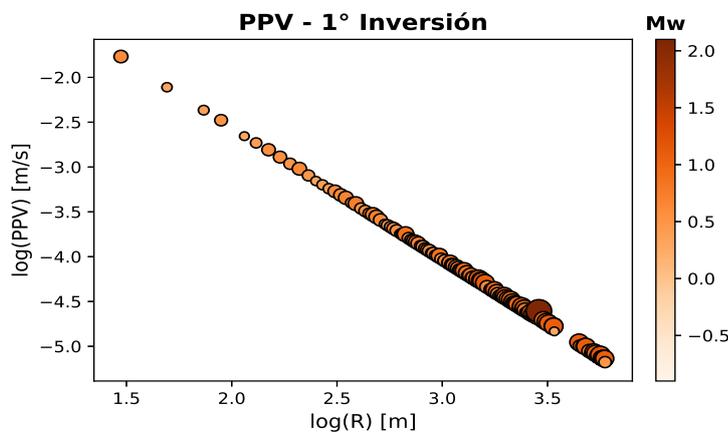


Figura 3.2: Gráfica Logarítmica de la Distancia Hipocentral en metros y Velocidad Máxima (PPV) en metros por segundo. Recalculada con los coeficientes resultantes de la primera inversión. Además, la barra de colores representa la Magnitud Momento (M_w) en [Nm].

La figura 3.2 muestra la curva resultante tras realizar la primera inversión y se observa que se logra el ajuste lineal que buscábamos aplicando el método de inversión por mínimos cuadrados. Se mantiene la tendencia descendiente a medida que nos alejamos de la fuente. Notar que se mantiene que los datos acumulados en los primeros metros son bastante menos, esta vez, bajo los 100 metros, por lo que el ajuste no influye al menos en esta parte de la distribución. En cuanto a las magnitudes no se ven afectadas por el procedimiento.

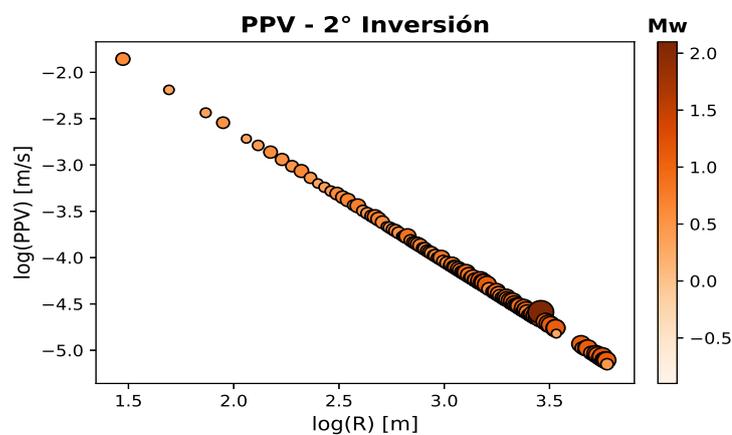


Figura 3.3: Gráfica Logarítmica de la Distancia Hipocentral en metros y Velocidad Máxima (PPV) en metros por segundo. Recalculada con los coeficientes de la segunda inversión. Además, la barra de colores representa la Magnitud Momento (M_w) en [Nm].

La figura 3.3 no muestra mayor diferencia con la anterior gráfica 3.2. Tras realizar una segunda inversión buscando mejorar el ajuste de los coeficientes no existe un cambio ni mejora visible, la curva continúa manteniendo la tendencia descendiente, la dispersión de los datos se ha eliminado y se conserva la distribución de pocos eventos a distancias cortas. Esto último, es un punto a discusión debido a que no se sabe si es a causa de la falta de continuidad de la base de datos o de por sí, en el área de estudio a distancias cercanas a la fuente no suelen ocurrir demasiados eventos de esta naturaleza.

3.2. Análisis

3.2.1. Análisis de Distribución de las Variables de la Ecuación de Ground Motion

Como ya se explicó en la metodología los datos originales de las explosiones fueron sometidos a una limpieza bajo diferentes criterios. Por ende, la tabla 3.2 nos muestra como cambiaron los valores de las variables predictoras magnitud momento M_w y distancia hipocentral R , además de la variable de velocidad máxima PPV , mostrando sus mínimos, máximos y promedios en cada caso, antes y después de ser sometidos a algún tipo de filtro.

		Mínimo	Promedio	Máximo
M_w	No Filtrados	-1.50000	0.59714	2.10000
	Filtrados	-1.50000	0.58842	2.1000
R	No Filtrados	25.90392	59.27347	5980.35676
	Filtrados	25.90392	1285.02408	5980.35676
PPV	No Filtrados	0.00000	0.35496	102.30000
	Filtrados	0.00000	0.04264	4.39400

Cuadro 3.2: Valores Mínimo, Promedio y Máximo para las variables predictoras Magnitud Momento M_w , Distancia Hipocentral R y la variable de Velocidad Máxima (PPV), para información No Filtrada y posteriormente Filtrada (datos descartados).

Para los valores de M_w no se observa un cambio en su mínimo o máximo independiente de los datos eliminados, pero el cambio se refleja en que la media se posiciona ligeramente más baja para los valores de magnitud filtrados, sin embargo, no se considera destacable. Por otro lado, los valores de distancia hipocentral, tampoco sufren cambios en los extremos, pero hay un cambio significativo en el promedio de estos valores que supera una diferencia de 1200 metros, sugiriendo que la mayoría de los datos descartados se concentraban a distancias más cercanas a la fuente.

El cambio más drástico ocurre para los valores de Peak Ground Velocity, donde se observan diferencias importantes en los máximos. Los filtros logran deshacerse de los valores escapados que podrían haber generado conflictos en la resolución del estudio y nos quedamos con números pequeños de velocidad máxima que suele ser lo esperado para amplitudes registradas en las minas.

La tabla 3.3 resume los valores extremos y la media de las mismas variables no filtradas y filtradas de la tabla 3.2, pero con la diferencia de que los datos para distancia hipocentral y velocidad máxima se les aplicó el logaritmo en base 10 y posteriormente se les clasificó en bins, tal y como se explicó en el capítulo anterior. A la variable M_w no se le aplica el logaritmo, ya que la ecuación de ground motion en la que se basa este estudio 1.5 se emplea de esa manera, de todas formas, si se clasifica en celdas como los otros dos parámetros.

		Mínimo	Promedio	Máximo
M_w	Filtrados	-1.50000	0.58842	2.10000
	Bins	-0.90000	0.51820	2.1000
R	Log	1.41337	2.91306	3.77673
	Bins	1.47376	3.25066	3.77673
PPV	Log	-6.36021	-3.88304	0.64286
	Bins	-6.02228	-4.40244	-1.57323

Cuadro 3.3: Valores Mínimo, Promedio y Máximo para las variables predictoras Magnitud Momento M_w , Distancia Hipocentral R y la variable de Velocidad Máxima (PPV), para información en base logaritmo de 10 para distancia y el PPV más la agrupada en celdas (bins).

Con respecto a los valores observados en tabla 3.3, hay que recordar que la distribución de los bins se hizo en base a la distancia hipocentral, por lo que el reordenamiento de datos en sus respectivas celdas depende exclusivamente de ese parámetro.

Comparativamente podemos comentar acerca de algunos cambios posteriores a la clasificación en celdas cada 20 metros. La magnitud momento sufre una re distribución que provoca cambios en el valor mínimo, el cual aumenta. La media es más baja, por lo que la tendencia de la distribución es hacia valores de magnitud más pequeños.

Por el lado de la distancia no hay mayores cambios en los extremos, sin embargo, la media para los valores encerrados en bins aumenta, así como la tendencia de concentración de los datos a distancias mayores.

Por último el PPV , sufre una re distribución que mejora y parece más estable considerando la posición de los extremos con respecto al promedio. Mencionar que en general, estadísticamente es esperable que el valor máximo en cada caso se conserve, debido a que es muy difícil deshacerse de estos valores aún con filtros o reagrupación.

A continuación se muestran y se analizan histogramas para las diferentes variables implicadas en la ecuación de movimiento del suelo 1.5, y así notar como va cambiando la distribución de los datos a lo largo de los procedimientos realizados en el estudio.

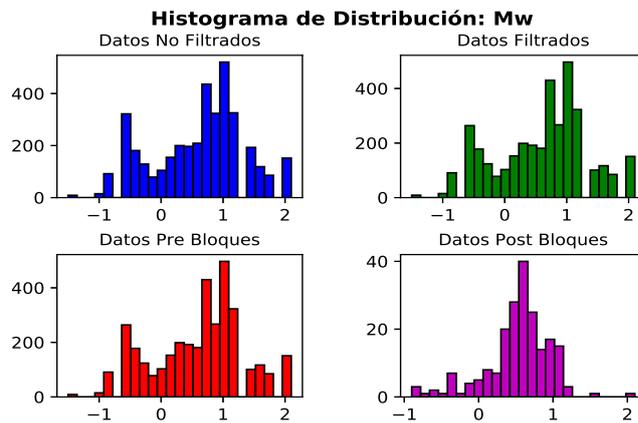


Figura 3.4: Histograma para los valores de Magnitud Momento o Hanks-Kanamori para datos originales, filtrados, previo a las celdas y posterior a estas. El eje horizontal representa la Magnitud Momento o Hanks-Kanamori y el eje vertical el número de eventos.

Para la variable magnitud momento M_w , cuya distribución se retrata en la figura 3.4, podemos destacar como esta mejora una vez se aplica la clasificación por bloques con criterio de distancia hipocentral, ya que tiende a formar una curva campana típica de la distribución gaussiana. El histograma confirma algo que no puede apreciarse en los valores extremos de las tablas previas, y esto es, que el método de separar los datos por celdas y promediar los valores dentro de estas es efectivamente un procedimiento que beneficiaría la inversión posterior.

En la figura 3.5 el comportamiento de la distribución muestra que la aplicación de filtros y reordenamiento de datos realmente no consiguió mejorar notablemente, mas bien, se observa una tendencia de eventos a mayores distancias. De todas maneras, este punto es bastante interesante, ya que, en los resultados de las inversiones en la sección anterior, observábamos que tanto en los nuevos ajustes como en la data original se repetía que la concentración de datos a cortas distancias era bastante pobre. El histograma confirma que hace falta una mejor cobertura de datos con buena resolución a distancias cercanas a la fuente.

Para la imagen 3.6 al igual que con los valores extremos analizados con anterioridad se confirma que evidentemente hay una concentración de datos de velocidad

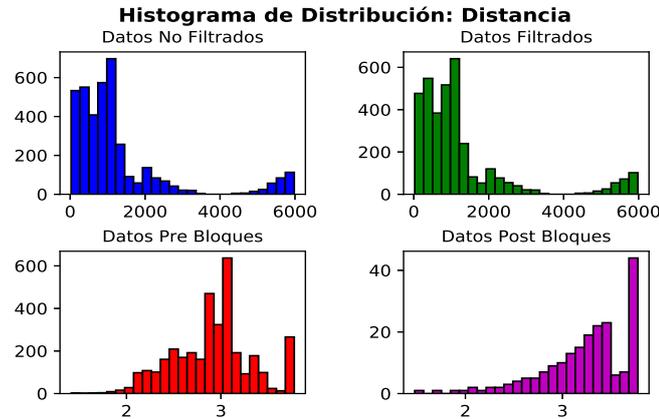


Figura 3.5: Histograma para los valores de Distancia Hipocentral para datos originales, filtrados, previo a las celdas y posterior a estas. El eje horizontal representa la distancia hipocentral en metros y el eje vertical la cantidad de eventos.

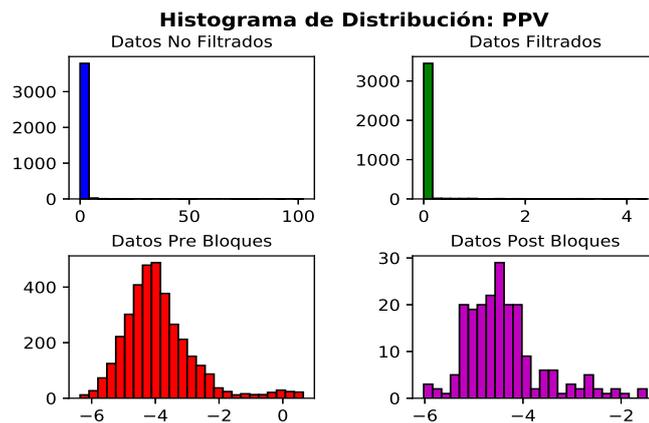


Figura 3.6: Histograma para los valores de Peak Particle Velocity para datos originales, filtrados, previo a las celdas y posterior a estas. El eje horizontal representa los valores de velocidad máxima en metros por segundo y eje vertical el número de eventos.

máxima en valores pequeños. La distribución en pre bloques donde los valores de amplitud ya se encuentran en logaritmo base 10, muestra un poco mejor la distribución. Puede parecer por la forma de la curva que están muy bien equiparadas las velocidades, pero en realidad no es así porque en peak está muy lejos del centro. Sin embargo, cuando se aplica la clasificación en bins, la distribución reparte datos hacia los costados del histograma, los cuales antes se concentraban únicamente cerca del peak de la curva.

3.2.2. Análisis de Distribución del Peak Particle Velocity

La tabla 3.4 a continuación, resume los valores extremos y la media de los PPV (Peak Particle Velocity) para la velocidad máxima predicha y las obtenidas de las dos inversiones realizadas. Esto se muestran con valores sin y con logaritmo aplicado.

		Mínimo	Promedio	Máximo
PPV Original	No Log	0.00019	0.54209	57.50741
	Log	-6.02228	-4.40244	-1.57323
PPV Recalculado 1	No Log	0.00001	0.00034	0.02026
	Log	-5.21431	-4.40244	-1.76757
PPV Recalculado 2	No Log	0.00001	0.00023	0.01392
	Log	-5.19076	-4.40244	-1.85632

Cuadro 3.4: Valores Mínimo, Promedio y Máximo para la variable de Velocidad Máxima (*PPV*), con los datos originales más los de la primera y segunda inversión. Las cantidades se presentan en formato sin logaritmo (No Log) y con logaritmo en base 10 (Log).

Previamente ya había luces de que existían valores escapados para las velocidades máximas (PPV), por eso a lo largo del procedimiento se aplicaron los criterios posibles para deshacernos de este tipo de datos. En la tabla 3.4 Si nos fijamos en los valores no logarítmicos, se evidencia con el extremo superior de los datos originales que existían uno o más valores bastante altos de PPV. Sin embargo, al pasar por el ajuste y resolver la inversión, los valores mínimo y máximo evidencian que nos quedamos con los valores pequeños de *Peak Particle Velocity* esperados para este tipo de eventos ocurridos en minas subterráneas. También se puede observar que el ajuste mejora el valor promedio considerablemente y se hace más consistente con los extremos. El valor mínimo se transforma también a un número más pequeño al realizar las inversiones.

La imagen 3.7 y 3.8 muestra el histograma para la distribución de los valores de PPV para los datos originales y para después de cada una de las inversiones realizadas, la primera en valores de velocidad en metros por segundo y la segunda, en logaritmo en base 10 de la velocidad máxima en metros por segundo.

Podemos observar que la concentración de los datos de velocidad para los valores originales es entre 0 y 8 [m/s], con algunos valores escapados presentes en los rangos de 10 a 20 [m/s] y entre 50 y 60 [m/s]. Al hacer la inversión notamos que

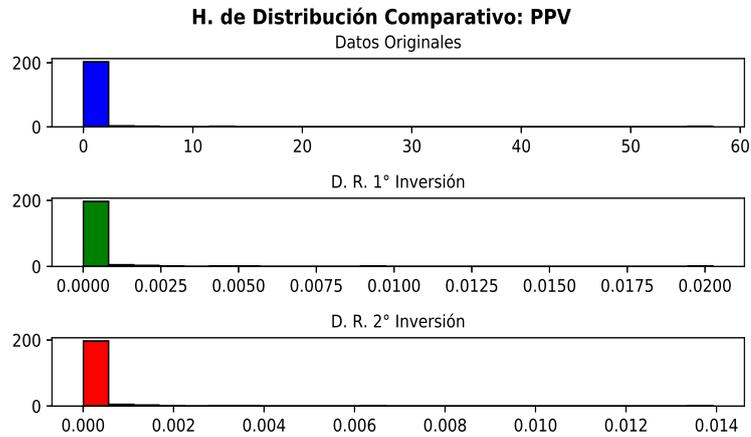


Figura 3.7: Histograma Comparativo para los valores de Peak Particle Velocity (PPV) para datos originales, primera inversión y segunda inversión. El eje horizontal representa los valores de velocidad máxima en metros por segundo y el eje vertical el número de eventos.

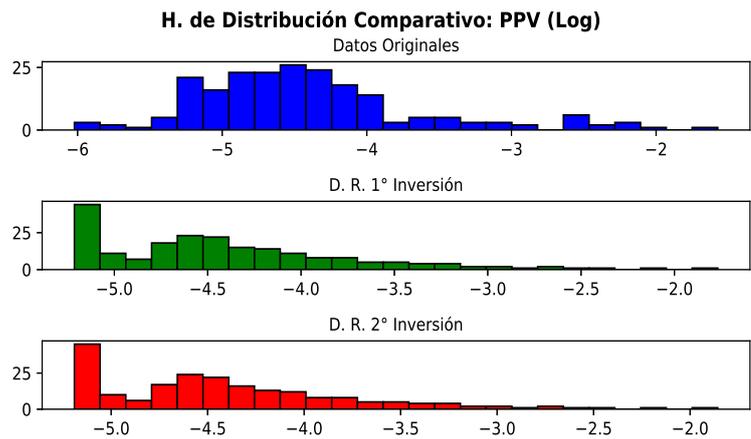


Figura 3.8: Histograma Comparativo para los valores de Peak Particle Velocity (PPV) para datos originales, primera inversión y segunda inversión. El eje horizontal se encuentra en base Logaritmo de 10 y representa la velocidad máxima en metros por segundo. El eje vertical representa el número de eventos.

		Original v/s Inversión 1	Original v/s Inversión 2	Inversión 1 v/s Inversión 2
Correlación de los PPV		0.88782	0.88778	0.99999
Diferencias entre los coeficientes	c_1	0.91465	0.90903	-0.00562
	c_2	0.32108	0.37137	0.05029
	c_3	3.42884	3.59521	0.16637

Cuadro 3.5: Valores de Correlación para los datos Originales comparados con el resultado de PPV de la inversión 1, datos originales comparados con el resultado de la inversión 2 y correlación entre los PPV de ambas inversiones. Además diferencias entre los coeficientes c_1 , c_2 y c_3 entre los obtenidos de las dos inversiones con los parámetros originales y diferencia entre los coeficientes obtenidos de las inversiones.

al menos estos valores extremos no existen más.

Por otro lado, al parecer la inversión no ha hecho demasiado por la distribución de los valores de velocidad máxima, ya que la mayor concentración de datos no sobrepasa la mitad de la curva. Esto se aprecia mejor en la distribución logarítmica.

3.2.3. Análisis Estadístico del Peak Particle Velocity

La correlación es un tipo de asociación entre dos variables numéricas y su finalidad es evaluar la tendencia, ya sea creciente o decreciente en los datos. Se dice que las variables están asociadas cuando una de ellas nos entrega información de la otra.

La correlación nos permite medir el signo y la magnitud de la tendencia entre dos variables. Un signo positivo nos indica una relación directa, un valor negativo una relación inversa y un valor nulo muestra que no hay tendencia entre las variables. Por otro lado, la magnitud puede tomar valores entre -1 y 1. Una buena correlación estará cerca de estos dos extremos, mientras que si está cerca de cero la tendencia es más leve y la dispersión de los datos es mayor.

Para el estudio se calculó la correlación entre los valores de *PPV* originales y lo obtenido de la primera inversión, los *PPV* originales y lo resultante de la segunda inversión y, por último se hizo una correlación entre ambas inversiones.

Los coeficientes resultantes se resumen en la primera fila de la tabla 3.5.

Se observa que para los tres casos existe una correlación directa, ya que son valores de signo positivo y con una tendencia fuerte de baja dispersión, esto a causa que los valores son cercanos a 1,0.

En la figura 3.9, la nube de puntos y la recta de ajuste nos permite visualizar que tan bien se correlacionan los datos entre ellos. Se puede interpretar que los puntos de la nube que descansan sobre o cerca de la recta de ajuste tienen una mejor correlación que aquellos que se encuentran más lejos. La curva $y = x$ es una referencia para ver que tanto nos acercamos a la asociación perfecta. Otra información que podemos rescatar de las gráficas es que la nube de puntos muestra una tendencia a acumularse en valores bajos de velocidad máxima (PPV) los cuales se presentan en mayoría a distancias mayores. Este comportamiento ya ha sido advertido a lo largo de todo el análisis y se reitera en esta representación estadística.

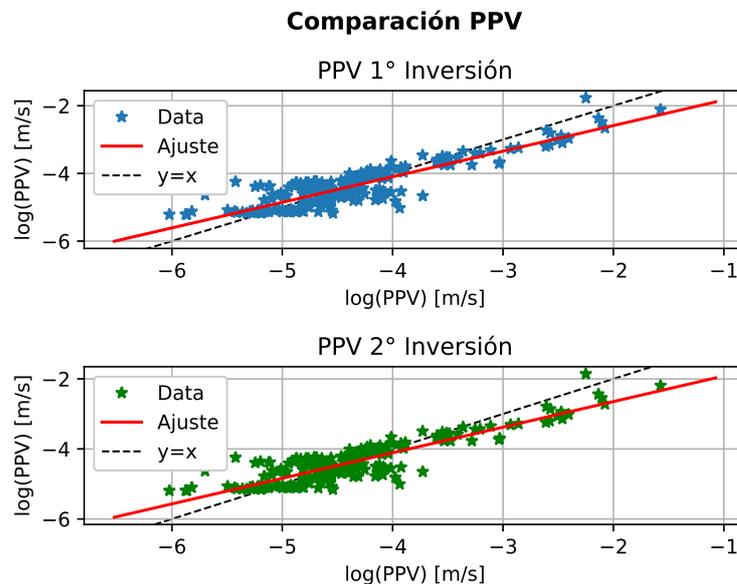


Figura 3.9: Gráfica Comparativa de Nube de puntos y Correlación entre el PPV Original con el PPV de la primera inversión (arriba). Nube de Puntos Correlación entre el PPV Original y la segunda inversión (abajo).

Mientras que de la figura 3.10, no hay demasiado que agregar además de lo mencionado anteriormente. Se puede rescatar como los ajustes hechos entre la data original y cada una de las inversiones, ambas curvas se acercan bastante a pesar de no ser completamente iguales, sin embargo, siguen la misma tendencia y se relacionan directamente.

Por último, mencionar algo respecto a los valores de diferencias entre los parámetros c_1 , c_2 y c_3 contenidos en la tabla 3.5, de los cuales contamos con los originales y los resultantes de las dos inversiones.

Los parámetros c_1 , dependiente de la magnitud y c_3 el término libre, son los

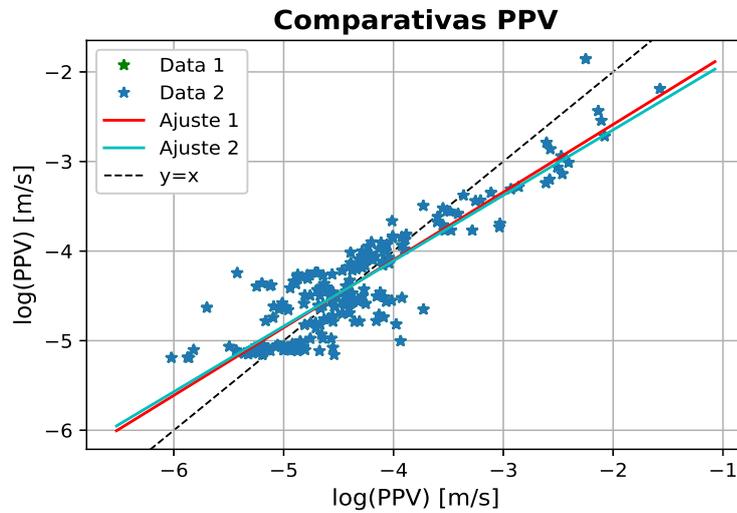


Figura 3.10: Nube de Puntos y Ajuste Comparativo del PPV Original versus los obtenidos por inversión.

que más varían entre sí al comparar sus valores de referencia con respecto a los calculados a través de las inversiones. Mientras que c_2 , el parámetro dependiente de la distancia hipocentral es el que tiene una diferencia menor al comparar los coeficientes originales con alguno resultante de las dos inversiones.

Es llamativo que entre una inversión y otra c_1 haya disminuido la diferencia, mientras que para c_2 y c_3 la diferencia se agudizó con respecto a los parámetros originales.

Capítulo 4

Discusión

En este apartado, se busca hacer énfasis en un par de aspectos que son importantes de destacar. Estos puntos están relacionados con la *Distribución Espacial* de las estaciones sísmicas y las explosiones de la base de datos y además, discutir sobre una comparación directa entre los resultados de Peak Particle Velocity con respecto a la distancia hipocentral, esto entre los datos originales y las curvas de las dos inversiones.

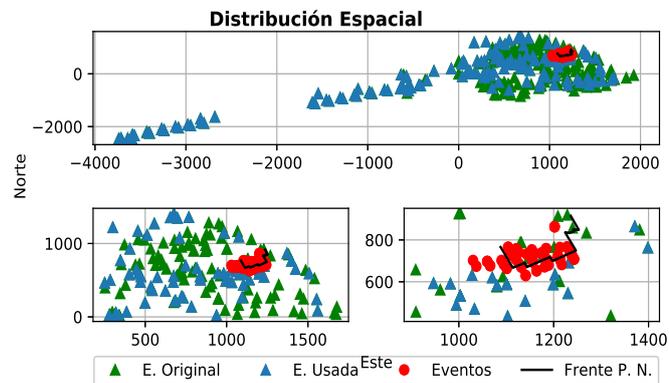


Figura 4.1: Distribución Espacial de las Estaciones Sísmicas Originales (verde) y Usadas (azul), además de los eventos (rojo) y la línea negra delimita el Frente de Pilar Norte.

- Sobre la distribución espacial de las explosiones y los sensores de la red sísmica. La imagen 4.1 muestra 3 vistas del mismo gráfico, pero haciendo énfasis cada vez más en la distribución espacial sobre la zona de estudio de Pilar Norte. Se escogió esta imagen con la finalidad de mostrar que como bien existe cobertura en la zona cercana al área de estudio, también las hay

a grandes distancias (hasta casi 6000 metros de distancia entre el evento y la estación más alejadas entre sí). El punto aquí, es que se podría ser más cuidadoso en la selección de las estaciones, definiendo límites de distancia bajo criterios fundados y que no afecten la tendencia de los datos. En el caso del presente estudio, no se consideró un filtro de distancias debido a que no nos convenía reducir aún más la base de datos.

Sin embargo, con un set de datos más extenso se podría tener en cuenta zonar las estaciones sísmicas a utilizar. Otra manera, como sugiere McGarr (2005) sería categorizar las estaciones en grupos considerando factores de sitio, esto es, amplificación del movimiento del suelo en la piel de las excavaciones. Las ecuaciones de ground motion similares a 1.5 no cuantifican el efecto de sitio, en nuestro caso aprovechamos de agregarlo dentro de la matriz de inversión, pero de todas formas, se podría aplicar algo similar a lo que sugiere el autor.

- Sobre el Peak Particle Velocity original y los obtenidos gracias a la reconstrucción con los nuevos coeficientes. Para la figura 4.2, primero mencionar que se encuentra en escala logarítmica para una mejor visualización. Segundo, ya enfocándonos en el tema que se quiere recalcar en este punto, los datos originales varían concentrándose en mayor cantidad a mayores distancias y con valores de velocidad máxima bastante pequeños. Por su parte, las rectas obtenidas por las inversiones si bien siguen la misma tendencia descendente, consiguen ajustar linealmente los datos y por ende, nos arrojan los tres coeficientes que buscábamos de la ecuación 1.5. Además, por la forma en que acercan las curvas de ambas inversiones, se podría decir que sobre una distancia de 200 metros el ajuste es muy bueno, ya que en este punto se unen y no se nota la diferencia entre ellas como a distancias más cercanas a la fuente.
- Sobre la utilidad de realizar dos inversiones a los datos en vez de una. Tras realizar la primera inversión por método de mínimos cuadrados, se discutió sobre la idea de quedarnos con ese resultado, sin embargo, para fundamentar con mayor confianza acerca de estos valores se requería realizar algún tipo de test que evaluara exactitud, los más comunes con métodos que implican permutaciones. Esto requería necesariamente calcular un número considerable de inversiones reiterativamente, además de análisis estadístico extra, algo que es posible, pero que por los tiempos acotados del estudio

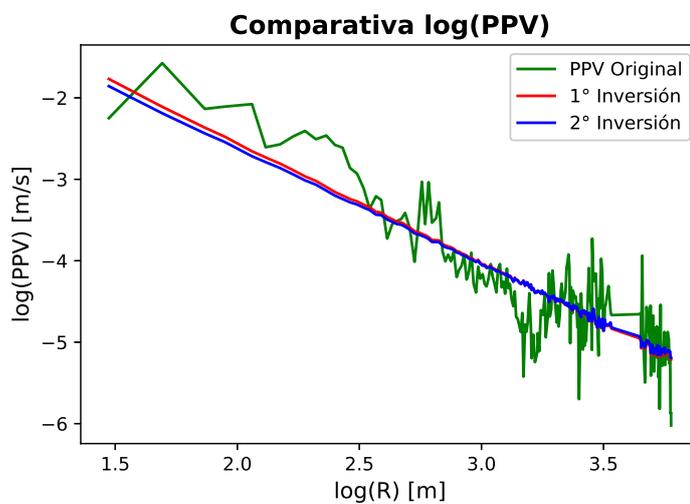


Figura 4.2: Gráfica comparativa de distancia hipocentral $\log R$ versus Peak Particle Velocity $\log PPV$ para las curvas de los datos originales, primera y segunda inversión.

no fue posible llevar a cabo. En su lugar, se resolvió calcular una segunda inversión, la cual sorprendentemente nos mostró que la diferencia entre los coeficientes de una y otra inversión no sufre un cambio considerable, por lo que nos llevó a pensar que en realidad las posibles siguientes inversiones seguirían el mismo patrón.

Capítulo 5

Conclusión y Recomendaciones

- Cubriendo el objetivo principal, efectivamente se puede resolver la inversión de la ecuación de ground motion mediante el método de mínimos cuadrados. Se consiguen los parámetros dependientes de la magnitud c_1 , de la distancia c_2 y término libre c_3 , siendo ajustados al sector de Pilar Norte con datos de explosiones registrados entre enero de 2018 y octubre de 2021. Esto permite también hacer un recálculo de las Peak Particle Velocity.

El método de mínimos cuadrados resulta rápido, sencillo y efectivo. Que el ajuste se lograra correctamente queda respaldado por varios puntos a favor, entre ellos que la tendencia de distribución de los datos de velocidad máxima jamás cambia a lo largo del estudio y coincide con la teoría que se conoce acerca de cómo funcionan las ecuaciones de atenuación como la dada para este trabajo. Se espera que a mayores distancias las amplitudes se vean atenuadas, por ende, disminuyan alejándose de la fuente. Incluso la distribución de la nube de puntos al analizar el estadístico de correlación tiene el mismo comportamiento, una gran concentración de PPV pequeños.

- En aspectos más particulares del desarrollo del trabajo, el tratamiento de la base de datos con los criterios de descarte y reordenamiento en celdas basados en la distancia hipocentral funcionó bastante bien, así que se puede asegurar como un método válido cuando nos encontramos con una base de datos no tan sólida en cuanto a distribución temporal, la cual si hubiese sido más pareja podría haberse abordado por períodos de tiempo. Sin embargo, para la información disponible las celdas mejoraron la distribución y permitieron

también que el procedimiento de inversión posterior se llevara a cabo de forma satisfactoria.

- Como desarrollar un completo análisis probabilístico por metodología de ground motion requiere tener una relación de atenuación adecuada a disposición, ajustada al sector de interés, llegamos a la gran pregunta sobre si se puede aplicar esta ecuación de ground motion con los 3 parámetros calculados a dicho análisis en un futuro cercano. La respuesta es positiva a pesar de que se requiere mejorar en varios aspectos, ya que mediante el estudio se pudo al menos visualizar que existe una manera de conseguir el mejor ajuste de la ecuación y sus coeficientes para una base de datos de eventos determinada.

5.0.1. Recomendaciones

- Como la fiabilidad de la ecuación de movimiento del suelo depende de la selección de datos apropiados (*Mendecki, 2018*), se debe procurar contar constantemente con una red robusta que contenga sensores capaces de medir amplitudes bastante pequeñas como las que se registran en el área minera.
- La teoría indica que el mayor daño por actividad sísmica se produce a distancias cercanas de la fuente, por ende, se recomienda una mayor cobertura de datos en esos rangos. Estadísticamente hablando los sismos inducidos son similares a los naturales a pequeñas distancias (*Atkinson, 2015*), la base de datos puede ser complementada sin problemas por eventos de origen tectónico de pequeñas magnitudes y poca profundidad, los cuales afortunadamente abundan. Esto siempre y cuando se procure tener correctamente localizados dichos eventos.
- Considerar cuantificar el efecto de sitio, ya sea en la relación de ground motion en alguno de sus términos o directamente incorporándola en el proceso de ajuste como se realizó en este trabajo.
- Por último, recomendar una actualización periódica de los parámetros de la relación de ground motion a medida que vaya incorporándose nueva información a la base de datos y definir áreas diferenciadas dentro de la mina donde cada sector tenga su propio ajuste de coeficientes teniendo en cuenta también información del tipo geológica.

Bibliografía

- [1] (2018). Intro a panel caving :: Construmine.
- [2] Atkinson, G. M. (2015). Ground-motion prediction equation for small-to-moderate events at short hypocentral distances, with application to induced-seismicity hazards. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105:981–992.
- [3] Belmonte-Pool, A. (2007). *ANÁLISIS SÍSMICO PILAR NORTE – DIVISIÓN EL TENIENTE*. DERK INGENIERÍA GEOLOGÍA LTDA.
- [Chilena] Chilena, M. Fracturación hidráulica en acción.
- [5] Chodacki, J. (2016). New ground motion prediction equation for peak ground velocity and duration of ground motion for mining tremors in upper silesia. *Acta Geophysica*, 64:2449–2470.
- [6] Codelco (2020). Nuevo sistema sísmico facilita la información para las áreas productivas.
- [7] David, H. (2017). Analisis de la sismicidad inducida en la unidad minera el porvenir - cerro de pasco 2006 - 2008. *Unsa.edu.pe*.
- [8] Douglas, J. (2003). Earthquake ground motion estimation using strong-motion records: a review of equations for the estimation of peak ground acceleration and response spectral ordinates. *Earth-Science Reviews*, 61:43–104.
- [9] Douglas, J. and Aochi, H. (2008). A survey of techniques for predicting earthquake ground motions for engineering purposes. *Surveys in Geophysics*, 29:187–220.
- [10] Douglas, J. and Edwards, B. (2016). Recent and future developments in earthquake ground motion estimation. *Earth-Science Reviews*, 160:203–219.
- [11] Douglas, J., Edwards, B., Convertito, V., Sharma, N., Tramelli, A., Kraaijpoel, D., Cabrera, B. M., Maercklin, N., and Troise, C. (2013). Predicting ground motion from induced earthquakes in geothermal areas. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103:1875–1897.
- [12] Dunlop, R. (2001). "fundamentos para la conducción de la respuesta sísmica a un método de caving"pl-i-202/2001.

- [13] Eneva, M., Van Aswegen, G., and Mendecki, A. (1998). Volume of ground motion and seismic hazard. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 35(4):393–394.
- [14] Estay, R. (2014). Metodología para la evaluación del desempeño de indicadores sísmicos en sismicidad inducida por la minería.
- [15] Gou, Y., Shi, X., Zhou, J., Qiu, X., Chen, X., and Huo, X. (2020). Attenuation assessment of blast-induced vibrations derived from an underground mine. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 127:104220.
- [16] Hanks, T. C. and Kanamori, H. (1979). A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research*, 84:2348.
- [17] Kaiser, P., McCreath, D., Tannant, D., Brummer, R., Maloney, S., Vasak, P., and Xiaoping, Y. (1990). Canadian rockburst support handbook.
- [18] Kaiser, P. K. and Maloney, S. M. (1997). Scaling laws for the design of rock support. *Seismicity Associated with Mines, Reservoirs and Fluid Injections*, pages 415–434.
- [19] Karzulovic, A. (2006). Criterios de homologacion para una mineria en roca primaria dt-cg-2006-02.
- [20] LINES, L. and TREITEL, S. (1984). A review of least-squares inversion and its application to geophysical problems*. *Geophysical Prospecting*, 32:159–186.
- [21] Ma, J., Dong, L., Zhao, G., and Li, X. (2019). Ground motions induced by mining seismic events with different focal mechanisms. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 116:99–110.
- [22] Malovichko, D., Cuello, D., and Valdivia, E. (2018). Analysis of damaging seismic event on 24 december 2011 in the pilar norte sector of el teniente mine. *Proceedings of the Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving*.
- [23] McGarr, A. (1984). Scaling of ground motion parameters, state of stress, and focal depth. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89:6969–6979.
- [24] McGarr, A. and Fletcher, J. B. (2005). Development of ground-motion prediction equations relevant to shallow mining-induced seismicity in the trail mountain area, emery county, utah. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95:31–47.
- [25] McGarr, A., Green, R. W. E., and Spottiswoode, S. M. (1981). Strong ground motion of mine tremors: Some implications for near-source ground motion parameters. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71:295–319.
- [26] Mendecki, A. and Lötter, E. (2018). Ground motion hazard: Elt-nml.
- [27] Mendecki, A. J. (2015). Mine seismology reference book.

- [28] Muñoz, R., Jorquiera, P., and Balboa, S. (2018). Integrated monitoring with tomographies and borehole inspection in pillars of production level in pilar norte – el teniente mine.
- [29] Muñoz, R., Jorquiera, P., Olgúin, S., and Cubillos, J. (2020). Estimación de la calidad de pilares de roca en el np de mina pilar norte mediante la medición integrada de tomografías y “breakouts” registrados en perforaciones de inspección grmd-dgd-i-0013-2020.
- [30] Peláez, J. A. (2011). "sobre las escalas de magnitud".
- [31] Potvin, Y. and Wesseloo, J. (2013). Towards an understanding of dynamic demand on ground support. *Proceedings of the Seventh International Symposium on Ground Support in Mining and Underground Construction*.
- [32] Tselentis, G.-A. and Danciu, L. (2010). Probabilistic seismic hazard assessment in greece – part 1: Engineering ground motion parameters. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10:25–39.
- [33] Wang, Q., Qiu, S., Cheng, Y., Li, S., Li, P., Huang, Y., and Zhang, S. (2022). Amplification effect of near-field ground motion around deep tunnels based on finite fracturing seismic source model. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*.
- [34] Wang, X. and Cai, M. (2017). Numerical modeling of seismic wave propagation and ground motion in underground mines. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 68:211–230.
- [Zuniga] Zuniga, H. El fenomeno de estallido de rocas: Importancia del monitoreo sismico. *www.academia.edu*.

Apéndice A

Anexo

A.1. Gráficas Relacionadas al Estudio

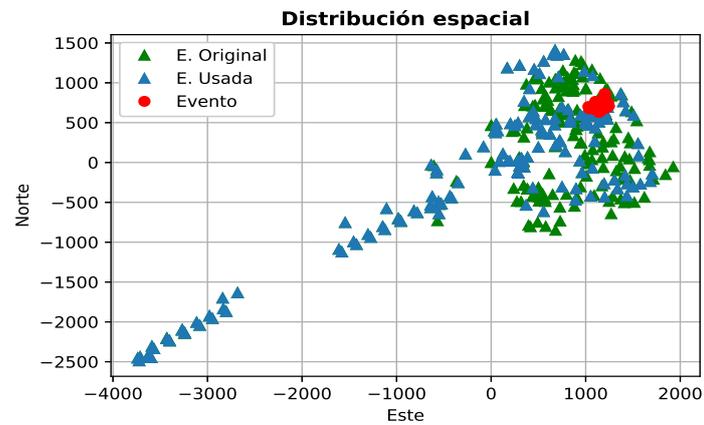


Figura A.1: Distribución Espacial de las Estaciones Originales, Estaciones Usadas y Eventos dados para el estudio, en coordenadas mina Este y Norte.

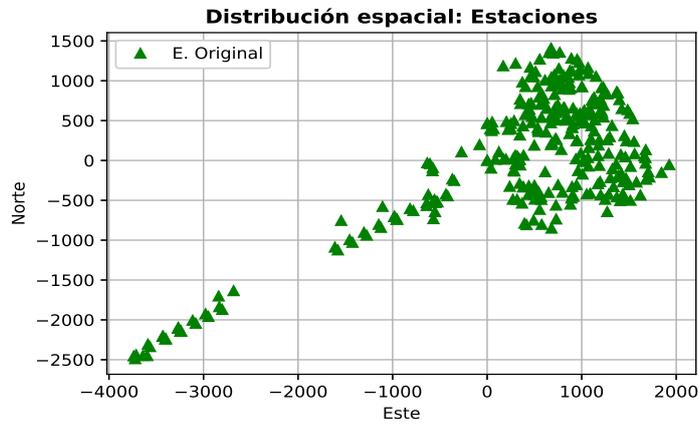


Figura A.2: Distribución Espacial de las Estaciones Usadas para el estudio, en coordenadas mina Este y Norte.

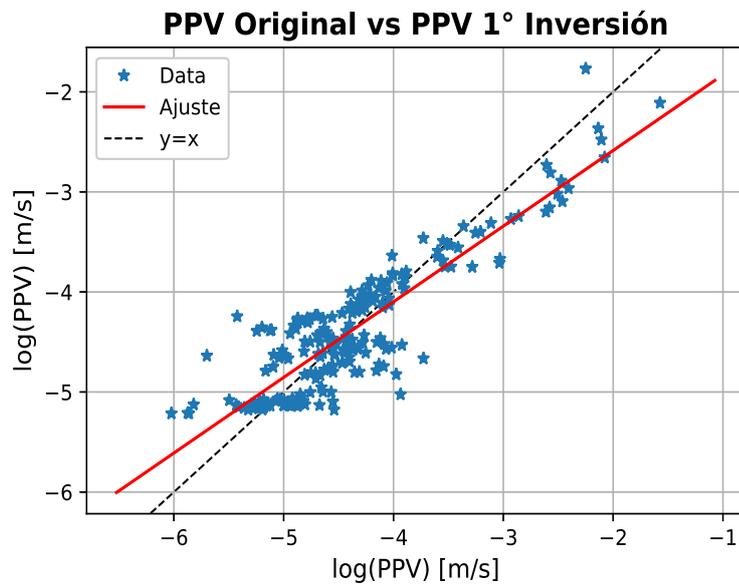


Figura A.3: Correlación PPV Original versus PPV recalculado tras la primera inversión.

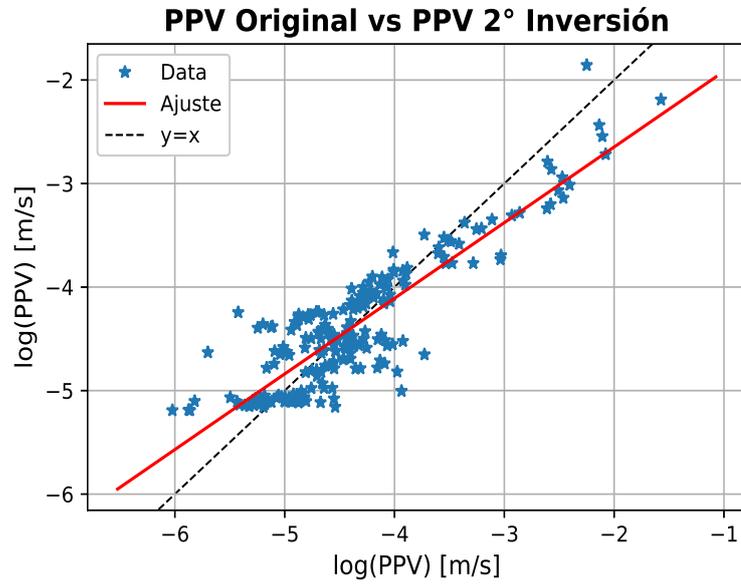


Figura A.4: Correlación PPV Original versus PPV recalculado tras la segunda inversión.

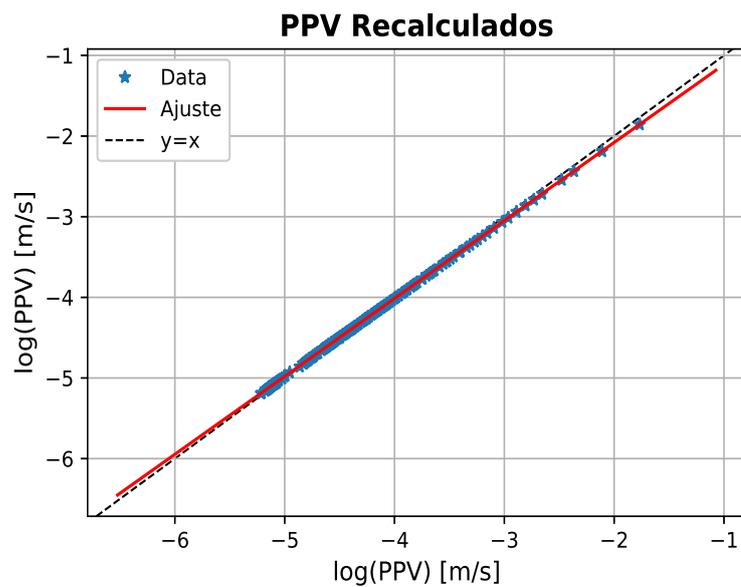


Figura A.5: Correlación entre los PPV resultantes de las dos inversiones.