

DEPARTAMENTO DE GEOFISICA FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS UNIVERSIDAD DE CONCEPCION, CHILE



ANÁLISIS DE SISMICIDAD INDUCIDA EN MINA SUBTERRÁNEA RÍO BLANCO SECTOR NORTE III PANEL ÁREAS 15, 16 y 17 NIVEL 16 HUNDIMIENTO CODELCO DIVISIÓN ANDINA

DIEGO ROMERO CASTRO

Tesis de pregrado para optar al título profesional de Geofísico

Profesor Supervisor: Dr. ARTURO BELMONTE-POOL VILLANUEVA

Concepción, Chile. 13 de abril de 2012



DEPARTAMENTO DE GEOFISICA FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS UNIVERSIDAD DE CONCEPCION, CHILE



ANÁLISIS DE SISMICIDAD INDUCIDA EN MINA SUBTERRÁNEA RÍO BLANCO SECTOR NORTE III PANEL ÁREAS 15, 16 y 17 NIVEL 16 HUNDIMIENTO CODELCO DIVISIÓN ANDINA

DIEGO ROMERO CASTRO

Miembros del Comité: Dr. ARTURO BELMONTE-POOL VILLANUEVA Dr. KLAUS BATAILLE BOLLWEG Dr. MATTHEW ROBERT MILLER

Tesis de pregrado para optar al título profesional de Geofísico Concepción, Chile. 13 de abril de 2012

Índice general

Ag	gradecimientos	VII
Ín	ndice de figuras	XVI
Íno	idice de tablas	XVII
Re	esumen	1
Ab	bstract	3
1.	Introducción 1.1. Antecedentes Generales 1.2. División Andina CODELCO Chile 1.2.1. Reseña Histórica Mina Subterránea Río Blanco 1.2.2. Ubicación Geográfica Mina Río Blanco 1.2.3. Clima 1.3. Método de Explotación. 1.3.1. Descripción de los Métodos de Explotación Aplicados en Mina Río 1.4.1. Red de Monitoreo Micro-sísmico División Andina	5
2.	Hipótesis y Objetivos 2.1. Objetivo General 2.2. Objetivos Específicos 2.3. Hipótesis de Trabajo	13
3.	Marco de Referencia y Métodos 3.1. Estado del Arte 3.1.1. Parámetros Sísmicos 3.1.2. Parámetros de Fuentes Sísmicas 3.1.3. Errores en los Parámetros de la Fuente 3.1.4. Parámetros de la Sismicidad 3.1.5. Sismicidad Inducida Bajo un Método de Caving 3.2.1. Sistema Sísmico 3.2.2. Descripción del Software a Utilizar 3.2.3. Procesamiento y Análisis de los Datos 3.2.4. Descripción Método de Picado	15

4.	Resu	ıltados	39
	4.1.	Comparación Método de Picado de Eventos Sísmicos	39
		4.1.1. Distribución Según Magnitud	41
		4.1.2. Índice de Energía y Volúmen Aparente	42
		4.1.3. Lev Gutenberg-Richter $G-R$	44
		414 Radio de Brune	45
		415 Difusividad Sísmica	46
		4.1.6. Erecuencia Sísmica v Razón F_{c}/F_{c}	47
	12	Clasificación de Eventos Sísmicos	51
	4.2.	4.2.1 Clasificación Sagún Características de la Señal	51
		4.2.1. Clasificación Según Calacterísticas de la Señal	54
	12	4.2.2. Clashicación Segun Distribución Espacial	54 64
	4.3.	Dack-Analysis	64
		4.3.1. Distribución Espacial y Temporal de Eventos Ssmicos	64
		4.3.2. Parametros Sismicos	08
		4.3.3. Mecanismos Focales	/4
5	Inct	alación Sistema Sísmico Áreas 16 y 17 Nivel 16 de Hundimiento III Panel	85
	5 1	Introducción	85
	5.1.	Volúmen de Influencia: Área de Interés y Ubicación Espacial de los Sensores	85
	53	Descrinción de Componentes	87
	5.5.	5.3.1 Sensores Geófonos 4.5 [Hz] v 14 [Hz]	87
		5.3.1. Sensores deoronos 4,5 [Hz] y 14 [Hz] $\dots \dots \dots$	0/
		5.3.2. Sismometros (QS, SAQS, GS)	00
		5.5.5. Cables de Conexion	90
		5.3.4. Unidades de Control y Comunicación (Broquera)	91
	5 4	5.3.5. Plan Instalación Geofonos y Cajas Sismicas	92
	5.4.	Instalación Geotonos y Lechado de Pozos	94
	5.5.	Instalacion Cajas Sismicas en Nivel 16 Hundimiento	101
	5.6.	Conexiones Cajas Sismicas-Broquera	103
	5.7.	Conexiones en Broquera	105
6	Disc	usión	109
0.	61	Métodos de Picado de Eventos Sísmicos	109
	6.2	Clasificación de Eventos Sísmicos	110
	6.3	Back Analysis	110
	0. <i>5</i> .	Dack-Allarysis	111
	0.4.		111
7.	Con	clusiones v Recomendaciones	113
	7.1.	Conclusiones	113
	7.2.	Recomendaciones	114
A.	Cara	acterización Geológica-Geomecánica Áreas 14, 15, 16 y 17 Nivel 16 Hundimiento y 16	j –
	1/2 I	Producción III Panel	115
	A.1.	Caracterización Áreas 14 y 15	115
		A.1.1. Litología	115
		A.1.2. Caracterización Estructural	116
		A.1.3. Contacto Primario Secundario	118
		A.1.4. Frecuencia de Fracturas	120
		A.1.5. RMR (Laubscher 1996)	121
	A.2.	Caracterización Áreas 16 y 17	123
		A.2.1. Litología	123
		A.2.2. Caracterización Estructural	123
		IV	120
		1 1	

A.2.3	. Contacto Primario-Secundar	io				 					 . 12	26
A.2.4	. Caracterización Geotécnica					 				•	 . 12	27

Bibliografía

Agradecimientos

Un agradecimiento a CODELCO División Andina por permitir realizar esta Tesis en sus instalaciones. Particularmente, deseo agradecer al grupo de Geomecánica, en especial a Daniela Villegas M. y Luis Quiñones A. por su apoyo, disposición y enseñanzas.

Agradezco a mis padres Isaac Romero Ll. y Yolanda Castro M. por su incondicional apoyo, confianza y cariño. A mi familia por su comprensión y alegría. Gracias por ayudar a forjar este sueño en realidad, por sus sonrisas de cada día que son el motor que alimenta mi alma.

Agradezco a mi Novia Yenifer Carrillo P., por su compañia, cariño, paciencia y apoyo a lo largo de todos mis años de Universidad, "*La vida te envía Angeles, personas que te guían y ayudan a caminar en ella*", eres mi cable a tierra, gracias por ello.

Un especial agradecimiento al Departamento de Geofísica (DGEO) de la Universidad de Concepción, en particular a los profesores; Arturo Belmonte, Klaus Bataille y Matthew Miller por su formación teórica y práctica durante la carrera y consejos tanto en lo profesional como en lo personal.

Finalmente, agradecer a todos mis amigos, en especial a Anibal Faúndez y Alejandro Sanhueza, por su alegría y apoyo, por ayudarme a escapar de la tensión y el estrés, por simplemente ser las grandes personas que son.

A todos, Muchas Gracias.

A la memoria de Paola Romero Castro..... Mi Ángel Guardián.

Índice de figuras

1.1.	Ubicación Mina Río Blanco.	7
1.2.	Proceso de Hundimiento.	9
1.3.	Proceso de Hundimiento.	9
1.4.	Esquema del método de explotación Hundimiento de Bloques. (www.atlascopco.cl)	10
1.5.	Esquema del método de explotación Panel Hundimiento. (www.atlascopco.cl)	11
1.6.	Rol de un sistema sísmico en la faena minera.	12
3.1.	Fuerzas equivalentes a la fuente sísmica.	21
3.2.	Proyección de mecanismos focales.	21
3.3.	Corte y extensión en formación de un bloque.	22
3.4.	Definición del parámetro Índice de Energía.	23
3.5.	Propagación de Hundimiento hacia la superficie debido a la Extracción en minería por método de Hundimiento de Bloques.	27
3.6.	Esquema descriptivo del método de Hundimiento. Se destacan volumenes de influencia, activo y de desplome.	27
3.7.	Cavidad en un macizo y las direcciones principales de movimiento del macizo hacia la cavidad	29
38	Distribución de los geófonos A: Vista hacia Norte B: Vista hacia Este C: Vista en planta	2)
0101	D: Detalle de la ubicación en Nivel 16 (Tomado de Informe de Práctica "Procesamiento y	
3.9.	Analisis de Informacion de Sistema de Monitoreo Sismico", 2011) Diseño del sistema de monitoreo Noviembre 2010 (Tomado de Informe Técnico "Servicio	31
	de Instalación y Conexión de Geófonos en Nivel 16 Hundimiento Mina Subterránea",	
a 10	2010).	32
3.10.	Visualización de evento en software Jmts.	33
3.11.	Caracteristicas del filtro Butterworth High-Pass utilizado	35
4.1.	Diferentes sectores de sismicidad, se observan 3 sectores; sector Norte (verde), sector	• •
	Centro (azul) y sector Sur (blanco), además del volumen Global.	39
4.2.	Distribución espacial según Magnitud M_W All.	41
4.3.	Distribución espacial según Magnitud M_W Sample.	41
4.4.	Sector Global; <i>IE</i> obtenido usando la totalidad de los registros (azul), <i>IE</i> obtenido usando	
	la muestra (verde), diferencia (rojo) y tendencia lineal en ambos casos. Ejemplo de	12
15	Comportamiento del parametro	42
4.3.	Sector Giobal, VAA usando la totalidad de los registros (azul), VAA usando la indestra	12
16	(verde) y unerencia (10j0). Ejempio de comportamiento del parametro	43
4.0.	Ley O-K usando todos los registros para los 4 sectores. $M_W = 0.19$ maxima con $b = value = -1.6322$	44
47	Lev G-R usando una muestra de los registros para los 4 sectores $M_{W} = 0.25$ máxima con	
	b - value = -1,5115	44
4.8.	Sector Global; RB usando la totalidad de los registros (azul), RB usando la muestra	
	(verde), diferencia (rojo). Ejemplo de comportamiento del parámetro.	45
	-	

4.9.	Sector Global; Dif. usando la totalidad de los registros (azul), Dif. usando la muetra (verde), diferencia (rojo). Ejemplo de comportamiento del parámetro.	46
4.10.	Frecuencia Sísmica Acumulada obtenida a partir de la totalidad de los registros para los 4 sectores.	47
4.11.	Frecuencia Sísmica Acumulada obtenida usando una muestra de los registros para los 4	47
4.12.	Número acumulado de eventos sísmicos aceptados en cada hora del día All v/s Sample.	47
4.13.	Comparación número de eventos por día All v/s Sample	47
4.14.	Número de eventos por día sector Norte All v/s Sample	48
4.15.	Número de eventos por día sector Centro All v/s Sample	48
4.16.	Número de eventos por día sector Sur All v/s Sample	48
4.17.	Sector Global; Razón E_S/E_P obtenido a partir de la totalidad de los registros (azul), E_S/E_P obtenido usando la muetra (verde), diferencia entre ambos (rojo). Ejemplo de comportamiento del parámetro.	49
4.18.	Señal registrada en Geófono Tri-axial 4,5 $[Hz]$ Fecha: 19/11/2010 Hora: 15:56:41 Site: 44 componente Norte-Sur (superior), Este-Oeste (intermedia) y Vertical (inferior). Tipo	51
4.19.	Señal registro con componetes nectenciales definidas	51
4.20.	y su espectrograma característico muestra componentes frecuenciales variables Señal registrada en Geófono Tri-axial 4,5 $[Hz]$ Fecha: 26/11/2010 Hora: 09:42:59 Site:	51
	43 componente Norte-Sur (superior), Este-Oeste (intermedia) y Vertical (inferior). Señal altamente contaminada con baja frecuencia.	52
4.21.	Señal registrada en Geófono Tri-axial 4,5 $[Hz]$ Fecha: 19/11/2010 Hora: 08:27:47 Site: 43 componente Norte-Sur (superior), Este-Oeste (intermedia) y Vertical (inferior). Tipo de registro que no corresponde a un evento sísmico.	53
4.22.	Señal registrada en Geófono Tri-axial 4,5 $[Hz]$ Fecha: 19/11/2010 Hora: 07:52:35 Site: 43 componente Norte-Sur (superior), Este-Oeste (intermedia) y Vertical (inferior). Señal que corresponde a un polvorazo donde cada uno de los peaks observados corresponden a tiras guamados. Pagiatro cin processor	52
1 23	Espectrograma característico para registros capturados en Geófonos: Site 42, 43, 44 y 45	55
4.23.	Espectrograma de los registros capturados en Geófono Site 41	55
4 25	Espectrograma de los registros captarados en Georono Site 41	56
4.26.	Sismogramas de cada Geófono del evento ocurrido Fecha: 19/11/2010 Hora: 12:26:30 en el sector Norte. Velocidad estimada (excluido Site 45) usando ajuste de mínimos	50
	cuadrados para Onda P 5375,61 $[m/s]$ y para Onda S 3154,46 $[m/s]$	57
4.27.	Evento ocurrido Fecha: 30/11/2010 Hora: 10:49:53 en el sector Centro.	58
4.28.	Sismogramas de cada Geófono del evento ocurrido Fecha: $30/11/2010$ Hora: $10:49:53$ en el sector Centro. Velocidad estimada (excluido Site 44) usando ajuste de mínimos cuadrados para Onda P 4172.44 $[m/s]$ y para Onda S 2756.66 $[m/s]$.	59
4.29.	Espectrograma característico para registros capturados en Geófonos: Site 42, 43, 44 y 45.	60
4.30.	Espectrograma de los registros capturados en Geófono Site 41	60
4.31.	Evento ocurrido Fecha: 21/11/2010 Hora: 02:40:08 en el sector Sur.	61
4.32.	Sismogramas de cada Geófono del evento ocurrido Fecha: 21/11/2010 Hora: 02:40:08 en	
	el sector Sur. Velocidad estimada (excluido Site 41) usando ajuste de mínimos cuadrados para Onda P 4097,95 $[m/s]$ y para Onda S 2992,55 $[m/s]$	61

4.33.	Columna de Extracción Acumulada como altura de columna para el mes de Noviembre,	
	línea verde indica el Avance del Hundimiento al 30/11/2010, marcas en rojo denotan	
	eventos considerado para cada sector y triángulos celestes corresponden a la ubicación de	
	cada Geófono	62
4.34.	Vista hacia Este de la Figura 4.33. Se observa que el Geófono del Site 41 se encuentra	
	muy cercano al frente de Hundimiento (línea verde).	62
4.35.	Distribución espacial de la sismicidad en relación a la superficie definida por el Contacto	
	Primario-Secundario. Vista hacia NE (derecha) y perfil vertical vista hacia E (izquierda).	64
4.36.	Distribución espacial de la sismicidad a lo largo del sistema de estructuras principal S1.	
	Vista en planta (derecha) y vista siguiendo rumbo del sistema estuctural (izquierda).	64
4.37.	Distribución espacial sismicidad según magnitud M_{W} . Líneas negras indican tendencia de	
	los eventos sísmicos en cada sector (derecha). Perfil vertical vista hacia el Este (izquierda).	65
4 38	Distribución temporal de la Socavación desde el 17 al 30 de Noviembre de 2010. Cuadros	00
1.50.	en roio indican sectores Centro y Sur desde arriba hacia abaio	66
4 30	Movilidad temporal de la sismicidad en sector Norte. Imagen superior izquierda vista en	00
т.57.	planta, superior derecha perfil vertical bacia el Este e inferior izquierda sección vertical	
	hagia el Norte	66
4 40	Mavilidad temporal da la signicidad en sector Centro Imagen superior izquierde viste en	00
4.40.	niovindad temporar de la sistinicidad en sector Centro. Intagen superior izquierda socién vortical	
	pianta, superior defectia permi ventical nacia el Este e interior izquierda sección ventical	66
4 4 1	Mavilidad temporal da la significad en soster Sur Imagen superior izquierde viste en	00
4.41.	movindad temporal de la sistificidad en sector Sur. Imagen superior izquierda vista en	
	pianta, superior derecha permi ventical nacia er Este e interior izquierda sección ventical	66
4 42	Extracción commulado como alturo de columno en al mas de Noviembro, morros en verdo	00
4.42.	indiagn puntos de extragoión las marcas en pagra indiagn la significad. Sectores Contra	
	nuccan puntos de extracción, las marcas en negro mulcan la sistificidad. Sectores Centro	67
1 12	y sui en zonas de producción.	07
4.43.	la vontana da tiampo 17.20 da Noviembre: Clobal (dereaba) y sector Norte (izquierda)	
	Los quadros vardos indicon en valor modio de quantos los líneos reiso indicon lo modiona	
	Los cuadros verdes indican en valor indicon el primer y querte quintil respectivomente	
	los límitos inferior y superior de los líneos comportedos indicen los veloros extremes y	
	nos infintes interior y superior de las infeas segmentadas indican los valores extremos y	68
1 11	Estadíctica descriptiva del número de eventes sígnicos en cada hora del día a la largo de	00
4.44.	la vontene de tiempe 17.20 de Noviembre: soster Centre (dereche) y soster Sur (izquierde)	69
1 15	Distribución de quentos sísmicos e la large del día. Se abserva un sumento en el número.	00
4.43.	de eventes después de les polyanzas de hundimiente. El número de eventes entre	
	nelverazes disminuva neulatinemente	60
1 16	Avenas del Área de Sacavación Acumulada y Número de Eventes Acumulada en codo	09
4.40.	Avance del Area de Socavación Acumulada y Numero de Eventos Acumulado en cada	
	sector en el mes de Noviembre de 2010. Se observa la detención de la sismicidad en el	60
4 47	Les Cutenberg Dichter nors ande une de les socieres analizades. Se sinste h. Value	09
4.47.	Ley Gutenberg-Richter para cada uno de los sectores analizados. Se ajusta $b - value =$	70
1 10	$-1,0522$ implica $M_{Wmax} = 0,19$ usando Magintud de Cone $M_W = -2,2,\ldots$	70
4.40.	Ley Outenberg-Richter, se ajustan 2 rectas que representan una interpretación acerca del	70
4 40	Avance del Área de Seconoción A sumulade y Volumen A parente A sumulade en code	70
4.49.	Avance del Alea de Socavación Acumulada y volumen Aparente Acumulado en cada	71
1 50	Solution A compute A computed (lines appl) of f directory in the form f Clabel (lines -1)	/1
4.50.	Volumen Aparente Acumulado (línea azul) e Indice de Energia Giobal (línea Verde).	/1
4.51.	Volumen Aparente Acumulado (línea azul) e indice de Energia sector Norte (línea verde).	/1
4.52.	volumen Aparente Acumulado (línea azul) e Indice de Energía sector Centro (línea verde).	/1
4.53.	volumen Aparente Acumulado (linea azul) e Indice de Energia sector Sur (linea verde)	/1

4.54.	Avance del Área de Socavación Acumulada y Difusividad Acumulada en cada sector en el mes de Noviembre de 2010.	72
4.55.	Variación temporal Radio de Brune en cada sector.	73
4.56.	Variación temporal Razón E_S/E_P en cada sector	73
4.57.	Distribución espacial sismicidad según Índice de Energía. Vista en planta.	74
4.58.	Selección de Mecanismos Focales en sector Norte. Líneas rojas indican sistemas estruc- turales. Contornos indican Extracción Acumulada como altura de columna.	75
4.59.	Estimación radios de ruptura para eventos seleccionados, se estima volumen circular de macizo involucrado	77
4.60.	Sismicidad Norte entre magnitudes $-3 < M_W < -2$. Se observa un claro domino es- tructural dado por el sistema secundario de estructuras en este rango de magnitudes que permite la movilidad de eventos entre estructuras mayores de Norte a Sur (derecha). Vista en sección siguiendo rumbo de estructuras mayores (izquierda).	77
4.61.	Sismicidad Norte entre magnitudes $-2 < M_W < -1$. Se observa domino estructural dado por el sistema secundario de estructuras en este rango de magnitudes al igual que un dominio de eventos controlados por pequeñas rupturas en matriz de roca. Se observa eventos alojados sobre Galerías de Hundimiento (derecha). Vista en sección siguiendo rumbo de estructuras mayores. En este rango de magnitudes, casi la totalidad de los eventos se encuentran distribuídos entre 25 [m] sobre la Cota de Hundimiento y 10 [m] bajo la Cota (izquierda).	78
4.62.	Sismicidad Norte entre magnitudes $-1 < M_W < 0$. Se observan algunos eventos alojados sobre estructuras mayores que cortan la zona y algunos que se encuentran en los alrededores de convergencias de estructuras (derecha). Vista en sección siguiendo rumbo de estructuras mayores (izquierda).	78
4.63.	Selección de Mecanismos Focales en sector Centro. Líneas rojas indican sistemas estruc- turales. Contornos indican Extracción Acumulada como altura de columna.	79
4.64.	Selección de Mecanismos Focales en sector Centro. Líneas rojas indican sistemas estruc- turales. Contornos indican Área de Socavación.	79
4.65.	Estimación radios de ruptura para eventos seleccionados, se estima volumen circular de macizo involucrado	80
4.66.	Selección de Mecanismos Focales en sector Sur. Líneas rojas indican sistemas estruc- turales. Contornos indican Extracción Acumulada como altura de columna.	82
4.67.	Selección de Mecanismos Focales en sector Sur. Líneas rojas indican sistemas estruc- turales. Contornos indican Área de Socavación.	82
4.68.	Estimación radios de ruptura para eventos seleccionados, se estima volumen circular de macizo involucrado.	83
5.1.	Ubicación Geófonos Área 17 Nivel 16 Hundimiento.	86
5.2.	Geófono 4,5 [<i>Hz</i>]	87
5.3.	Caja de conexión Junction Box.	88
5.4.	Esquema conexiones QS	89
5.5.	Esquema de conexiones GS	90
5.6.	Esquema cable de comunicación (uno o dos pares de cobre) entre sismómetros IMS (QS, SAQS, GS) y unidades de control y comunicación (MR/485)	90
5.7.	Esquema de conexión entre componentes que forman el sistema de Monitoreo Micro- sísmico	91

5.8.	Se muestra la ubicación de 7 pozos (puntos en color rojo) dispuestos para la instalación de 10 geófonos tri-axiales (3-A) en las calles GH-77, GH-83, GH-87, Socavones Este y Oeste, y las cajas sísmicas (triángulos color azul y lila) dispuestas a lo largo del XC-29. En la circunferencia color verde se ubica la caja de interconexión que recoge todo el cableado proveniente de las cajas sísmicas y prosigue por el Socavón Este hasta llegar a	
	la Broquera. La Tabla 5.5 muestra información detallada de la ubicación de cada geofono	
	y su conexión a cada caja sísmica.	92
5.9.	Cortes en el principio del despiche	94
5.10.	Ingreso del despiche de la lechada.	94
5.11.	Soporte especial para el sensor en la primera vara metálica del kit de instalación. El	
	sensor se encuentra con sus soportes extendidos para acoplarse a las paredes del sondaje.	95
5.12.	Varas metálicas para levantar sensor hasta su posición final	96
5.13.	Unión de varas metálicas asegurada con perno para no perder una sección durante su	
	extracción desde el sondaje una vez que el sensor se encuentre en su posición final	96
5.14.	Alineamiento final del sensor con el norte geográfico	97
5.15.	Taco de cemento para sellar el sondaje.	97
5.16.	Instalación Geófonos Sitio 4 y 5 (14 y 4,5 [Hz] respectivamente) GH-79 Area 17 Nivel	
	16 Hundimiento.	98
5.17.	Componentes principales de la lechadora.	98
5.18.	Conexión lechadora a tubo de ingreso de lechada al sondaje.	99
5.19.	Despiche indicando llenado de pozo	99
5.20.	Vista sondaje completamente grauteado.	100
5.21.	Esquema interno de instalación en sondaje (instalación de dos sensores a diferentes	
	alturas). Resulta indispensable la correcta identificación de los componentes que se	100
	extienden fuera del pozo durante la instalación.	100
5.22.	Esquema de conexiones para caja sísmica QS (análoga para SAQS) se indican las conex-	
	iones de cada sensor 3-A con especificación de las componentes por colores Tabla 5.2).	101
5 00	Para la QS no se conecta el par de cables para la orientación del sensor.	101
5.23.	Esquema conexion caja GS (derecha). Conexiones componentes del sensor 3-A se indica	101
5 24	necesario la conexion de la orientación del sensor (izquierda).	101
5.24.	Caja sismica QS (derecna). Caja sismica SAQS (izquierda)	102
5.25.		102
5.20.	Esquema de conexiones en Broquera.	103
5.27.	En la Broquera, rack con unidades MR232/485, Equinox, DSLAM, I-Splitter, Puertos	105
5 20	LAN y Fuente de Poder.	105
5.20	Vista antenoi del Rack.	100
5.29.	Figure must reasted a conscience final on la Proquera	100
5.50.	Esquema muestra estado de conexiones iniai en la Broquera	107
A.1.	Litología interpretada del Nv 16 Hundimiento, sector áreas 14 y 15. En color sólido,	
	mapeos de labores. En achurado, interpretación a partir del modelo de secciones 2008.	115
A.2.	Litología interpretada del Nv 16 Producción, sector áres 14 y 15. En color sólido, mapeos	
	de labores. En achurado, interpretación a partir del modelo de secciones 2008	116
A.3.	Litología secciones XC-65, XC-55 y XC-45. En línea verde, base del Nivel 16 Hundimien-	
	to y proyección vertical Áreas 14 y 15	116
A.4.	Fallas mayores interpretadas para las áreas 14 y 15 Nivel 16 Hundimiento	117
A.5.	Fallas mayores en sector comprendidos por las áreas 14 y 15	118
A.6.	Modelo 3D de alturas de columna de roca primaria en Nivel 16 Hundimiento. Se aprecia	
	como la altura de columna baja abruptamente hacia el XC-47 y sube hacia el oeste, a la	
	altura del GH-73.	119

Índice de tablas

3.1.	Coordenadas mina de las estaciones sísmicas año 2010	32
3.2.	Criterio de aceptación de eventos, interpretación de error residual y esperado	34
3.3.	Contenido del catálogo de eventos sísmicos .evp	34
4 1	Némera de ministra en esta de la sectiona marca de Ostalar en Nacionalas de 2010	40
4.1.	Numero de registros en cada dia de catalogo meses de Octubre y Noviembre de 2010	40
4.2.	Identificación sub-intervalos temporales.	41
4.5.	Numero de eventos sistincos segun magnitud M_W	42
4.4.	Tendencias por tramo e indice de Correlación All v/s Sample Global.	43
4.5.	Estadística de la variación RB e Indide de Correlación All v/s Sample Global	45
4.6.	Estadística de la variación Difusividad e Indide de Correlación All V/s Sample Global.	46
4./.		49
4.8.	Estadística de la variación E_S/E_P e Indide de Correlación All V/s Sample Global	50
4.9.	Ubicación de los sensores en la vertical con respecto al Nivel de Hundimiento (3262	
4.10	m.s.n.m.).	57
4.10.	Resumen principales velocidades estimadas para los diferentes sectores del volumen de	(\mathbf{a})
4 1 1		63
4.11.	Numero de eventos de diferentes magnitudes M_W en cada uno de los sectores analizados.	65
4.12.	Errores en localización de eventos para cada sector.	15
4.13.	Selección de mecanismos focales sector Norte.	/6
4.14.	Selección de mecanismos focales sector Centro.	81
4.15.	Selección de mecanismos focales sector Sur	84
5.1.	Resistencia típica observada en Geófonos de 4,5 [Hz] y 14 [Hz] y Ancho de Banda de	
	operación.	87
5.2.	Descripción y uso de cables de salida Geófonos de 4,5 [Hz] y 14 [Hz].	88
5.3.	Conexiones QS y SAQS.	89
5.4.	Distancia de cables de conexión entre caja sísmica y caja de interconexión.	93
5.5.	Ubicación sensores Geófonos en sondajes verticales Área 17 Nivel 16 Hdmto	93
A 1	Sistemas Estructuralas Áraas 14 y 15	117
A.1.	Caracterización general de las estructuras mayores Áreas 14 y 15	117
A.2.	Sistemas Estructurales Áreas 16 y 17	124
A.J.	Sistemas Estructurales Aleas 10 y 17.	124
A.4.	Caracterización general de los estructuros meyores Áreas 16 y 17	123
A.J.	Caracterization general de las estructuras mayores Areas 10 y 17	120

Resumen

Un proceso de fracturamiento en un macizo rocoso dentro de la actividad minera involucra una perturbación dinámica, la cual induce mecanismos de reequilibrio que dan paso a procesos de deformación tras superar cierto umbral de resistencia dentro de la roca. Estos procesos de reequilibrio generan la apertura de estructuras y/o fallas pre-existentes, es decir, rupturas en el macizo desde las cuales cierta cantidad de energía se libera y transmite en forma de ondas elásticas que se propagan por el medio; estas ondas son capturadas por los sensores que conforman una red de monitoreo.

En minería, el estudio y comprensión del comportamiento del macizo perturbado es de vital importancia, ya que su adecuado control se transforma en una herramienta que permite un seguimiento y continuidad del proceso productivo de la faena minera, en otras palabras, proporciona una operación segura tanto para el personal como para la maquinaria e infraestructura comprometida.

Bajo éste contexto, durante los meses de Octubre-Noviembre del año 2010 CODELCO División Andina mantuvo operativa una red de monitoreo de micro-sísmicidad registrando los eventos sísmicos generados a partir de las perturbaciones inducidas por la actividad minera. El interés geofísico consiste en analizar diferentes parámetros que describen cuantitativamente cada evento sísmico, los que son extraíidos a partir de los sismogramas registrados por la red. Las variaciones espacio-temporales de estos parámetros, así como la distribución de los eventos describen la respuesta del macizo en función de cuándo y dónde éste es perturbado.

Para realizar el estudio se consideran tres etapas fundamentales mediante las cuales los datos son validados y analizados. El desarrollo de un método de pre-procesamiento que ayude a acelerar la manera en la que son calculados los parámetros sísmicos parece ser fundamental, ya que el pre-procesamiento de los sismogramas (identificación de fases P y S) corresponde a la etapa que demanda mayor cantidad de tiempo. El completo porcesamiento de los datos se realiza usando algunos softwares de procedencia IMS (Institute of Mine Seismology) y algoritmos desarrollados en entorno de programación con el fin de automatizar y agilizar la manera en la que son obtenidos los resultados.

Finalmente se contempla la instalación de la nueva red de monitoreo micro-sísmico para CODELCO División Andina que se encuentra operativa en estos momentos y con proyección durante el presente año. La comprensión de las partes que la forman, asi como de los diferentes componentes que permiten obtener un dato de buena calidad resulta fundamental para conocer completamente el sistema, el cual envuelve tanto el layout del volúmen de macizo a monitorear, las perturbaciones aplicadas por parte de la minería y la formación del macizo fragmentado que induce los eventos sísmicos. Un registro del proceso de instalación responde a una herramienta fundamental de consulta útil para la instalación de una nueva red de monitoreo en un futuro.

Abstract

A process of fracturing in a rockmass in mining involves a disturbance dynamics, which entice rebalancing mechanisms that lead to deformation processes after passing a certain threshold of resistance within the rock. These processes generate rebalancing open structures and/or pre-existing faults, ie, breaks in the rockmass from which certain amount of energy is released and transmitted in the form of elastic waves that propagate through the middle, these waves are captured by the sensors that make up a monitoring network.

In mining, the study and understanding of the disturbed mass behavior is of vital importance as its proper control becomes a tool for monitoring and continuity of the production process of the mine, in other words, it provides an operation safe for both personnel and machinery and infrastructure compromised.

Under this context, during the months of October-November of 2010 CODELCO División Andina kept operating a monitoring network of micro-seismicity recorded seismic events generated from perturbations induced by mining. The geophysical interest is to analyze quantitatively different parameters describing each seismic event, which are extracted from the seismograms recorded by the network. The spatio-temporal variations of these parameters as well the distribution of the events described rockmass response depending on when and where it is disturbed.

For the study considers three basic stages through which the data are validated and analyzed. The development of a pre-processing method that helps accelerate the manner in which the seismic parameters are calculated to be crucial, since the pre-processing of the seismograms (identification of phases P and S) is the stage that demands more of time. The full processing data is done using some software from IMS (Institute of Seismology Mine) and algorithms developed in the programming environment to automate and streamline the way in which results are obtained.

Finally it includes the installation of the new network of micro-seismic monitoring for COELCO División Andina wich is operational at this time and in the current year. Understanding the constituent parts, as well as the different components that allow obtain good quality data is essential to know the entire system, which involves both the layout of the volume of rockmass for to monitor, the disturbances applied by the mining and the formation of fragmented rockmass inducing seismic events. A record of the process installation meets a fundamental tool useful reference for the installation of a new monitoring network in the future.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes Generales

El nombre CODELCO representa a la Corporación Nacional del Cobre de Chile, una empresa autónoma propiedad del Estado chileno. Su historia comienza con la aprobación del proyecto sobre Nacionalización de la Gran Míneria del Cobre, el 11 de julio de 1971.

Su negocio principal es la exploración, desarrollo y explotación de recursos mineros de cobre y subproductos, y su procesamiento hasta convertirlos en cobre refinado, y posterior comercialización.

Codelco es la empresa productora de cobre más importante a nivel mundial, alcanzando un promedio anual superior al millón 700 mil toneladas métricas de cobre refinado, y posee además, cerca del veinte por ciento de las reservas mundiales del metal rojo.

En la actualidad, Codelco está conformada por siete Divisiones: Chuquicamata, Radomiro Tomic, Salvador, Andina, El Teniente, Ventanas, y la recientemente creada, División Ministro Hales.

A lo anterior se agrega la participación en la propiedad de importantes empresas mineras, tales como: Minera Gaby S.A, donde posee el 100% de la propiedad, la operación El Abra, en la que posee el 49%, y además participa en otras asociaciones mineras orientadas a la explotación geológica, tanto en Chile como en el exterior.

1.2. División Andina CODELCO Chile

División Andina de Codelco-Chile, fundada en 1966, desarrolla sus actividades productivas a más de 3 mil metros de altura sobre el nivel del mar en la V región. Su producción se basa en concentrado de cobre y concentrado de molibdeno de alta calidad.

Andina posee un esquema de operación mixto, es decir, combinan minería a rajo abierto (Mina Don Luis) y minería subterránea (Mina Río Blanco, cuerpos Tercer Panel, sector LHD y Sector Parrillas), produciendo anualmente alrededor de 190 mil toneladas métricas de concentrados de cobre, además de colocar en los mercados unas 3 mil toneladas métricas de molibdeno al año.

La explotación de la Mina Subterránea, se realiza por los métodos de hundimiento por paneles en sus variantes LHD y Parrillas, de acuerdo a las características propias del yacimiento. En la mina subterránea Río Blanco se utiliza como sistema base de explotación el Método de Hundimiento Progresivo de Bloques (Block Caving) en los sectores de roca secundaria o con baja altura de columna de roca primaria;

contemplando a la vez, en los sectores de mayor altura de columna de roca primaria, la utilización del Método de Hundimiento por Paneles Variante Convencional (Panel Caving convencional).

1.2.1. Reseña Histórica Mina Subterránea Río Blanco

El 10 de Diciembre de 1966 es creada por Decreto de la República de Chile, *La Cerro Corporation*, con un aporte del 30% del capital por parte del estado y el 70% restante por parte de la Cerro Corporation.

El proyecto se inició en 1967 y consultó la construcción de Saladillo como campamento para el personal, construcción de una planta de beneficio subterráneo, un túnel de acceso, un pique de servicio e implementación del método de hundimiento por bloques para la explotación del yacimiento.

La iniciación oficial de la obra fue el 12 de enero de 1967, y en 1970 finalizaron los trabajos de adecuación del proyecto, iniciándose la producción el 24 de octubre de dicho año.

Entre 1970 y 1982 fue explotado el Primer Panel de la mina Río Blanco, localizado en el sector norte del yacimiento, mediante el sistema de Hundimiento de Bloques Tradicional. Su producción total fue de 41 millones de toneladas, con una ley promedio de cobre de 1.55%.

Posteriormente, entre 1982 y 1997, estuvo en funcionamiento el Segundo Panel, operado mediante el sistema de Hundimiento de Bloques mixto, que incluyó extracción manual a través de *buitras* y mecanizada por medio de equipos LHD y camiones de 30 toneladas.

El Tercer Panel incluye tres unidades geológicas mineralizadas principales, mineral secundario, primario y mixto las que son explotadas por el sistema de Hundimiento de Paneles y Hundimiento de Bloques.

En la actualidad está en plena operación el Tercer Panel, cuya producción, programada hasta el año 2015, incluye un total de 272 millones de toneladas con una ley de cobre promedio de 1.05%. Su producción diaria es de 45 mil toneladas de tratamiento de mineral.

1.2.2. Ubicación Geográfica Mina Río Blanco

División Andina desarrolla sus operaciones de explotación y procesamiento de minerales en la parte central de la Cordillera de Los Andes, a más de 3 mil metros de altura, en la Quinta Región de Valparaíso, a 38 [*Km*] de la ciudad de Los Andes.

El yacimiento Río Blanco se encuentra ubicado en la Cordillera de Los Andes, entre los 3070 y 4200 m.s.n.m. y a 60 [Km] al sudeste de la ciudad de Los Andes. El acceso se realiza a través del camino internacional que une Chile con Argentina, en un primer tramo de 34 [Km]. Luego, un tramo de 4 [Km] une esta ruta con la Villa Saladillo, en donde se sitúa el control de acceso a las dependencias del área industrial de la División.

El concentrado de molibdeno se recupera en la localidad de Saladillo, donde también, se filtran los concentrados de cobre y molibdeno, productos finales de esta operación minera.

Los relaves, se conducen por una canaleta de 87 [Km] de longitud hasta el embalse de Ovejería, ubicado a unos 30 [Km] al norte de Santiago, a 600 m.s.n.m.



Figura 1.1: Ubicación Mina Río Blanco.

1.2.3. Clima

El clima en el área del yacimiento Río Blanco es el típico de alta cordillera en Chile central y se caracteriza principalmente por:

- Precipitaciones principalmente entre los meses de abril a octubre siendo más frecuentes entre mayo y agosto, y se consideran escasas a nulas entre noviembre y marzo.
- Temperaturas medias ambientales muy bajas en otoño invierno (media aproximada de -13 [°C]) y moderadas a bajas en primavera verano (media aproximada de 15 [°C]). La temperatura media anual es de 6.4 [°C].
- La humedad relativa del aire es de un 15% hasta un 90% con una media inferior al 50% de humedad relativa. Rachas de viento predominantes NW-SE, que en invierno en condiciones extremas, pueden alcanzar los 100 [Km/h].
- El promedio anual de precipitación de nieve caída, expresada en valor medio de agua es 830 [mm].

Las condiciones indicadas y la topografía escarpada de la zona, favorecen la ocurrencia de avalanchas que dificultan las operaciones.

1.3. Método de Explotación.

La mina subterránea Río Blanco es explotada a través de métodos de hundimiento o caving, específicamente por Hundimiento de Bloques (Block Caving) y Hundimiento por Paneles (Panel Caving). Este tipo de metodología de explotación se caracteriza por inducir el desplazamiento vertical del cuerpo mineralizado en forma descendente, utilizando el efecto de la gravedad para la extracción. El desplazamiento vertical, se induce socavando la base de la columna de mineral que se desea extraer, y la socavación se realiza mediante perforación radial y tronadura.

En general esta forma de explotación (hundimiento), se aplica en mega yacimientos, como lo son los pórfidos cupríferos, que poseen leyes relativamente bajas. Pero se basa en la minería de gran escala, con una alta recuperación de reservas y con una alta tasa de producción y mecanización. Dentro de los métodos de explotación subterráneos, los de hundimiento son los que poseen un menor costo de extracción, a pesar de que requieren un gran número de desarrollos (labores mineras). Para una correcta aplicación de esta metodología, el tipo de roca que compone el yacimiento debe tener un alto grado de fracturamiento, para que a medida que la roca tenga espacio libre para desplazarse, se pueda fracturar y así efectivamente se desplace por efecto de la gravedad.

Este método de explotación genera una expresión en superficie, que se manifiesta a través de un cráter sobre la zona de explotación, produciéndose el fenómeno de Subsidencia.

La mecánica del hundimiento se puede resumir y explicar en los siguientes puntos:

- Inicio del hundimiento: Corresponde a la condición existente inmediatamente después de la socavación del área inicial que entrará en producción (debe recordarse que dependiendo de la variante de panel hundimiento, los frentes de socavación y de extracción pueden ser diferentes).
- Hundimiento virgen o sin conexión a superficie: Corresponde a la condición en que el hundimiento progresa en la vertical y/o en planta, pero no se ha producido la conexión a superficie y existe un Crown Pillar (pilar de corona) entre el techo de la cavidad y la superficie.
- **Conexión a superficie:** Corresponde a la condición en que se produce la ruptura del crown-pillar (pilar de corona) que existía sobre el techo de la cavidad y se conecta a la superficie. Esta etapa es especialmente importante porque define un cambio sustantivo en la forma, cinemática y modo de ruptura del volumen activo.
- Hundimiento transciente: Corresponde a la condición en que ya se ha logrado la conexión a superficie, pero el proceso de progreso del hundimiento todavía es afectado o "siente" un incremento del área socavada y en extracción.
- Hundimiento permanente o en régimen: Corresponde a la condición en que ya se ha logrado la conexión a superficie y en el sector considerado, el proceso de hundimiento no es afectado o "no siente" un incremento del área socavada y en extracción.

En **Figura 1.2** y **Figura 1.3**¹ se muestra un esquema de las distintas etapas o condiciones que presenta el hundimiento durante el progreso de una minería mediante panel hundimiento; desde la condición de inició de hundimiento, o inmediatamente después del desarrollo de la socavación basal, hasta la condición en que se tiene un sector importante con hundimiento en régimen, el cual no es afectado por incrementos adicionales del área socavada y en extracción.

1.3.1. Descripción de los Métodos de Explotación Aplicados en Mina Río Blanco.

Hundimiento Progresivo de Bloques.

Este método de explotación generalmente se aplica en mineral secundario, altamente fracturado y de baja competencia. Para aplicar esta metodología se utilizan bloques como unidad de explotación, por lo que el área que se desea hundir es dividida en bloques de mineral.

Para realizar una correcta explotación utilizando este método, es necesario desarrollar una variedad de niveles, y para el caso del III Panel de la mina Río Blanco son:

^I Karzulovic, 2001



Figura 1.2: Proceso de Hundimiento.



Figura 1.3: Proceso de Hundimiento.

- Nivel de Hundimiento (NH o UCL): Se encuentra a la cota 3224 m.s.n.m., y desde este nivel se socava la base del bloque de mineral que se desea extraer. La socavación se realiza a través de perforación y tronadura mediante tiros en abanico. Este nivel cuenta con galerías de hundimiento (GH) que son paralelas entre sí, que poseen una sección de 4 x 3.6 [m], también se encuentran otras labores llamadas cruzados que tienen la misma sección de las GH's.
- Nivel de Producción (NP): Este nivel consta de galerías de producción (GP) de 3 x 3 [m] de sección, las cuales se disponen en forma paralela entre sí, al igual que las galerías de hundimiento, pero estan ubicadas 14 [m] más abajo, por lo tanto el Nivel de Producción se encuentra a una cota de 3210 m.s.n.m. y las galerias estan espaciadas en la horizontal por 18 [m]. Desde estas galerías se extrae el mineral fracturado por los puntos de extracción, el cual llega desde el Nivel de Hundimiento a través de labores verticales denominados embudos.
- Nivel de Transporte (NT): En este nivel se aprecia un conjunto de galerías de carguío y transporte, y buzones de descarga. La sección de las galerías es de 5.5 x 5 [m]. El conjunto de galerías se encuentra a una cota de 3185 m.s.n.m. A este nivel llega el mineral proveniente del Nivel de Producción y lo hace a través de labores llamadas Piques de Traspaso de mineral (OP) que son desarrolladas desde el Nivel de Transporte hacia el Nivel de Producción.
- Subnivel de Ventilación (SNV): Este nivel consta de una serie de chimeneas de ventilación para la inyección y extracción de aire. Este Subnivel de Ventilación está a una altura de 3196 m.s.n.m.

Una vez desarrollados los niveles nombrados anteriormente, se sigue con el proceso de socavación del bloque de mineral, esto se hace desde el Nivel de Hundimiento, y así se da inicio al Hundimiento, donde el mineral cae a los embudos colectores y es extraído hacia las parrillas o buitras que se encuentran en las galerías de producción. Luego el mineral pasa por las parrillas, y se va al Nivel de Transporte mediante los OP's (ore pass).



Figura 1.4: Esquema del método de explotación Hundimiento de Bloques. (www.atlascopco.cl).

Hundimiento Progresivo de Paneles.

Este método de explotación nace como una variante del Hundimiento de Bloques, y se le denomina Hundimiento de Paneles o "Panel Caving". Fue creado para mineral primario, que es una roca menos fracturada y más competente que la roca secundaria. Además en el Hundimiento de Paneles se pierde la identidad de bloque, ya que se avanza con la explotación a través de una línea de avance denominada frente de hundimiento o socavación.

El sector del tercer panel es denominado Sector LHD y se encuentra emplazado en su mayoría en roca primaria.

Dentro del diseño de esta metodología de explotación se deben desarrollar ciertos niveles, los cuales aplicados al caso del III Panel de la mina Río Blanco son:

- Nivel de Hundimiento (NH, o UCL): Este nivel se encuentra en la cota 3251 m.s.n.m., y cuenta con galerías de hundimiento o de socavación que son paralelas entre sí, las cuales están espaciadas 26 [m]. También se desarrollan cruzados que conectan las galerías de hundimiento. Estas labores poseen una sección de 4 x 3.6 [m].
- Nivel de Producción (NP): Las distintas mallas de extracción utilizadas son de dimensiones de 13 x 13 [m], 13 x 15 [m] y 13 x 17 [m], esto se debe principalmente a que hacia el sector norte existe un aumento en la fragmentación, lo que deriva en un mayor espaciamiento entre brazos de producción (BPs).

Este nivel está ubicado a 3236 m.s.n.m. donde se desarrollan labores conocidas como galerías de producción (GP) cuya sección es de 4 x 3.6 [m], y al igual que las galerías de hundimiento

son paralelas entre sí y están espaciadas 26 [m] una de la otra. Existen también galerías que se intersectan con las de producción en un ángulo de 60°, con un espaciamiento entre ellas de 13 ó 15 [m] y que son paralelas unas de otras, estas se denominan galerías zanjas o brazos de producción y su sección es de 3.6 x 3.6 [m]. En los brazos de producción se encuentran los puntos de extracción de este método de explotación que son denominados zanjas.

- Subnivel de Ventilación (SNV): Este nivel se encuentra a una cota de 3222 m.s.n.m., aquí se disponen galerías para la inyección y extracción de aire, desde donde se desarrollan chimeneas o piques hacia los distintos niveles.
- Nivel de Control Granulométrico (NC): Es un nivel ubicado más abajo del Subnivel de Ventilación, a la cota 3210 m.s.n.m.

Aquí existen cámaras de picado en donde es recepcionado el mineral proveniente del Nivel de Producción, y por medio de parrillas se controla la granulometría, de manera que el mineral que cumpla con esta, pasa al nivel inferior a través de los piques de traspaso de mineral (OP). Si una colpa no tuviese la granulometría requerida y quedase en la parrilla de control, debe ser reducida por un martillo picador posicionado en las salas de control, hasta que pase completamente por la parrilla.

• Nivel de Transporte (NT): Es un conjunto de galerías de carguío y transporte, y se encuentra ubicado a una cota de 3185 m.s.n.m.

Cada galería tiene una sección de 5.5 x 5 [m] y en ellas se encuentran los buzones de descarga, que corresponden a infraestructuras que alimentan los camiones.

Una vez desarrollados los niveles descritos anteriormente, se da inicio a la secuencia de explotación, para ello se realizan las tronaduras de socavación en el Nivel de Hundimiento, y el mineral fracturado cae en las zanjas anteriormente abiertas. Luego utilizando maquinaria de bajo perfil, denominada LHD (Load Haul Dump), se extrae el material de los puntos de extracción ubicados en el Nivel de Producción, y es llevado a puntos de vaciado ubicados en las calles de producción y desde aquí se dirige al Nivel de Control Granulométrico para luego llegar al Nivel de Transporte.



Figura 1.5: Esquema del método de explotación Panel Hundimiento. (www.atlascopco.cl).

1.4. Sismicidad Inducida por Actividad Minera

Las perturbaciones generadas en el macizo rocoso sometido a las faenas mineras a través del Caving inducen diferentes procesos de rupturas que liberan una cierta cantidad de energía al medio circundante en forma de ondas, las cuales, son registradas por un sistema de monitoreo sísmico.

El rol que juega un sistema sísmico en este entorno minero se considera como una herramienta de control. En estricto rigor, una perturbación inicial en el macizo puede ser cuantificada en función del análisis de los eventos sísmicos que genera, en otras palabras, a partir de los resultados obtenidos de la perturbación inicial podemos modificar la forma en que el macizo es perturbado de manera de mantener controlado el sistema para evitar daños humanos, en maquinaria e infraestructura instrumentada.



Figura 1.6: Rol de un sistema sismico en la faena minem.

1.4.1. Red de Monitoreo Micro-sísmico División Andina

CODELCO División Andina posee una red de monitoreo micro-sísmico ubicada en Mina Rio-Blanco Nivel 16 Hundimiento III Panel formada por 6 Geófonos Tri-axiales de 4,5 [Hz] de procedencia Geoblast que se mantuvo en funcionamiento entre los días 7 de Octubre y 1 de Diciembre de 2010 con una brecha en la cuál el sistema se encontró inoperativo entre 1 al 16 de Noviembre.

Durante los meses en los que la red de monitoreo se encontró operativa se registraron una gran cantidad de registros sísmicos (mayoritariamente en el mes de Noviembre), esto hace importante el procesamiento día a día de las formas de ondas para llevar un correcto control temporal y espacial de la evolución de la respuesta del macizo en función de las variaciones de los parámetros mineros. Bajo este contexto, es necesaria la optimización del tiempo que se le dedique al procesamiento de los eventos a medida que se almacenan en el sistema. Un correcto mantenimiento a la red de monitoreo, así como una observación en los registros almacenados permiten mantener una fiabilidad en los datos a partir de los cuales la sismicidad es cuantificada.

La implementación de una red de monitoreo sísmico, características geólogicas-estructurales y geomecánica hacen posible una visión integrada de los diferentes procesos que sufre un volumen de roca que es llevado desde un material intacto a uno degradado, así como los diferentes ciclos que sufre en función de las variaciones espacio-temporales de los parámetros mineros aplicados.

Capítulo 2

Hipótesis y Objetivos

2.1. Objetivo General

- Procesar e interpretar información sísmica proveniente de la red de monitoreo micro-sísmico en período de tiempo comprendido 17-30 de Noviembre del año 2010 en Sector Norte III Panel Áreas 15, 16 y 17.
- Instalación de una red de monitoreo micro-sísmico en Áreas 16 y 17 Nivel 16 Hundimiento III Panel.

2.2. Objetivos Específicos

- Realizar el procesamiento de los datos de la red de monitoreo sísmico obtenidos en un intervalo de tiempo comprendido entre 17 a 30 de Noviembre del año 2010.
- Analizar las diferentes variables sísmicas con el fin de caracterizar la respuesta del macizo rocoso sometido a la actividad minera.
- Generar una correlación entre actividad sísmica registrada y actividad minera.
- Procesamiento directo de formas de ondas (sismogramas) con el fin de validar datos provenientes de la red de monitoreo.

2.3. Hipótesis de Trabajo

Las características que poseen los sismogramas registrados por los sensores de la red de monitoreo podrían tener diferencias significativas entre diferentes sectores del macizo sometido a actividad minera.

La características de la sismicidad en un macizo rocoso explotado por actividad minera dependerían de parámetros estructurales propios del macizo asi como de la evolución de la faena minera.

Capítulo 3

Marco de Referencia y Métodos

3.1. Estado del Arte

3.1.1. Parámetros Sísmicos

Todo evento sísmico tiene asociada una ruptura, que es fuente de ondas sísmicas, las cuales se propagan por un medio elástico¹.

La señal sísmica, para un rango de distancia mina, contiene dos fases principales generadas en la fuente: la fase compresional y la de cizalle, conocidas también como Ondas P y S, respectivamente. La información que guarda esta señal sísmica, se encuentra contenida en su amplitud y frecuencia característica, ya que estas dependen de:

- Resistencia y estado de esfuerzos de la roca.
- Tamaño de la fuente sísmica.
- Tasa de deformación durante el proceso de fractura.

Sí la distribución de los sensores es adecuada, en términos de cubrir el ó los eventos sísmicos registrados, es posible determinar entre otros parámetros, la ubicación de la fuente sísmica y tiempo de ocurrencia, y para cada una de las fases, se puede establecer la energía liberada, la caída de tensión y momento sísmico^{II}.

Localización de Fuentes Sísmicas

La localización de un evento sísmico, consiste en obtener desde la información recogida por una red sísmica, la cual corresponde a la serie de tiempo de la velocidad local de las partículas del medio en donde se encuentran acoplados los sensores, la información de las coordenadas de localización de la fuente sísmica (x_0, y_0, z_0) , y el tiempo origen del evento (t_0) , de esta manera obtenemos el hipocentro $h(x_0, y_0, z_0, t_0)$, y su proyección en superficie se conoce como epicentro^{III}.

Este parámetro de localización es básico para caracterizar un evento sísmico, en la perspectiva de entender la respuesta sísmica del macizo en función de la minería realizada.

Se pueden considerar tres factores que dependen directamente de la calidad con la que se obtiene esta localización:

^I Belmonte, 2005 ^{II} Belmonte, 2005 ^{III} Dunlop, 2001

- El cálculo de los párametros de la fuente sísmica.
- La interpretación de los eventos relativos a la minería desarrollada.
- La interpretación de gradientes espacio-temporales de la sismicidad y criterios de estabilidad del macizo rocoso en que estos eventos participen.

El algoritmo usado por el sistema *IMS* para estimar la localización, se basa en minimizar la siguiente expresión:

$$LOC(h) = \sum_{j} w_{j} |V_{j} \{ t_{j} - t_{a} - [T_{j}(h) - T_{a}(h)] \} |$$
(3.1)

Esta función corresponde a la suma de los residuos, es decir las diferencias entre los tiempos de llegada observados para las ondas de cuerpo P y S, y los cálculos para las *j*-estaciones que participan en el registro de un evento. Los valores de V_j son los valores medios de las velocidades de las ondas P o S definidas como datos de entrada para el sistema. Los valores t_a y T_a son promedios de los tiempos de llegada, y de los tiempos de viaje. Los valores de los pesos w_j son estimados por el sistema en función de la calidad de la determinación de los tiempos de llegada^I.

En general la localización depende del algoritmo utilizado para su determinación, pero al considerar una mayor densidad de estaciones y con una mayor precisión de los datos, la influencia del algoritmo seleccionado es menor.

3.1.2. Parámetros de Fuentes Sísmicas

Modelo de Fuente

Existen varios modelos de fuente sísmica que pueden usarse en la estimación de los parámetros de la fuente. El modelo utilizado por el sistema sísmico *IMS* es el Modelo Cinemático de Brune $(1970)^{II}$.

- Cinemático, la fuente se considera una dislocación.
- Fallamiento, es solamente por cizalle en un área circular plana.
- Iniciación del deslizamiento en todos los puntos de la superficie (no considera propagación de la ruptura con velocidad finita).
- Desplazamiento, es función del tiempo y la posición en el área fallada.
- Se asume 100% de caída de esfuerzos.
- Ondas de corte se propagan perpendiculares a la falla.
- Los parámetros de fuente no son función del ángulo entre la normal a la falla y el punto de observación.

Momento Sísmico

El momento sísmico es una estimación de las dimensiones geométricas de la deformación inelástica ocurrida en la fuente al momento de generarse el evento (deformación sísmica), sin dependencia del modelo de fuente considerado^{III}.

^I Dunlop, 2001 ^{II} Dunlop, 2001 ^{III} Dunlop, 2001
El momento sísmico se define como el producto entre la constante de rigidez del medio, el área involucrada en la zona de ruptura y el desplazamiento relativo promedio entre ambas caras que forman el plano de fractura. El concepto de momento sísmico supone que la fractura se ha desarrollado principalmente sobre un plano de falla (zona de contacto de dos bloques) cuyas dimensiones definen el área de ruptura¹.

Entonces el momento sísmico se expresa por:

$$M_o = \mu S \varepsilon \quad [N - m] \tag{3.2}$$

 μ corresponde a la constante de rigidez del medio ($\mu_{roca} = 3 \times 10^{10} [Pa]$), *S* es el área fallada y ε es la dislocación o desplazamiento medio en tal área.

Además, el momento es proporcional a la integral del pulso de desplazamiento en el campo lejano, y por lo tanto puede ser derivado directamente de las formas de ondas (sismogramas) registradas^{II}. Para estimar este parámetro el sistema *IMS* usa la siguiente relación:

$$M_{\rho} = 4\pi\rho V^3 DOR \tag{3.3}$$

donde ρ es la densidad del medio, V es la velocidad de ondas P o S, D es la distancia de registro a la fuente, O es el valor de la asíntota al tender la frecuencia a cero en el espectro de frecuencias de la fuente y R es el patrón de radiación de las ondas P o S, es decir, la amplitud de la onda en función de la dirección de propagación desde la fuente. El valor total del momento corresponde a la semi-suma de los momentos calculados a partir de las fases P y S.

Energía Radiada y Caída de Esfuerzos

La energía radiada es una estimación de la energía total radiada por la fuente, en forma de ondas elásticas o sísmicas. Se considera que la energía sísmica es proporcional a la integral del cuadrado del espectro de velocidades en el campo lejano y se puede obtener de las formas de las ondas registradas^{III}.

La estimación de energía radidada que realiza el sistema IMS considera la siguiente expresión^{IV}:

$$E_c = 4\pi\rho V S_V \tag{3.4}$$

donde S_V es la integral del cuadrado del espectro de velocidad de la fuente.

La energía radiada total se obtiene de la suma de las energías calculadas para las ondas P y S. En general, sus valores varían en un rango de 0,1% a 5% de la energía total usada para generar la ruptura.

La mayor parte de la energía radiada por los eventos ocurridos en la mina tiende a concentrarse en las ondas de corte, efecto más marcado en la medida que el mecanismo de generación se aproxima a un fallamiento sólo por corte, es decir, a un mecanismo de doble cupla^V.

En cuanto al parámetro de caída de esfuerzos, este determina la disminución de los esfuerzos en la zona de la fuente sísmica por efecto de la generación de la ruptura, y se calcula mediante la expresión^{VI}:

$$\boldsymbol{\sigma} = cM_o f_0^3 \quad [Pa] \tag{3.5}$$

donde $c = 1.8 \times 10^{-10}$ para una estimación basada en las ondas *S*, en un macizo competente primario confinado, M_o corresponde al momento escalar, y f_0 es la frecuencia esquina.

^I Belmonte, 2011 ^{II} Mendecki, 1997 ^{III} Dunlop, 2001 ^{IV} Mendecki, 1997 ^V Dunlop, 2001 ^{VI} Dunlop, 2001

Si se considera que los eventos sísmicos liberan energía de deformación acumulada cerca de la zona de fallamiento, se puede utilizar la energía sísmica radiada para estimar la caída de esfuerzos (ó caída de tensión), obteniéndose, de esta manera, otra expresión para definir la caída de tensión, donde se muestra que ésta es proporcional al momento sísmico e inversamente proporcional a las dimensiones de la falla¹.

$$\sigma = \frac{cM_o}{L^3} \quad [Pa] \tag{3.6}$$

La constante *c* depende de la forma de la falla y la dirección de ruptura. Para el caso de una falla circular, modelo utilizado por el Sistema Sísmico *IMS*, se considera que c = 7/16 y L = R, con R el radio circunferencial.

Tomando en cuenta la expresión anterior, la energía total de deformación (*W*) (Ecuación 3.7), es igual al producto del esfuerzo promedio (σ) durante el fallamiento, el deslizamiento medio (ε) y el área de falla (*S*). Además, la energía sísmica radiada es igual a la diferencia entre la energía total *W* y cierta cantidad de energía *H* perdida como fricción (Ecuación 3.8). Un límite inferior para la energía sísmica radiada de tensión y el momento sísmico (Ecuación 3.9)^{II}.

$$W = \sigma \varepsilon S \tag{3.7}$$

$$E = W - H \tag{3.8}$$

$$E_0 = \frac{\sigma}{2\mu} M_o \tag{3.9}$$

Combinando estas ecuaciones, se obtienen expresiones aplicables al problema sísmico-minero:

$$E_0 = \frac{1}{2\mu} \frac{cM_o^2}{L^3}$$
(3.10)

$$\frac{E_0}{D} \quad \frac{1}{L} \tag{3.11}$$

En términos globales, se considera que la energía sísmica radiada E_0 es idéntica a E. Esta condición se da siempre y cuando el esfuerzo final, en el momento que el fracturamiento se ha detenido, es igual al esfuerzo friccional, asociado a la energía perdida H^{III} .

Considerando la **Ecuación 3.11**, esta indica que la energía sísmica radiada por unidad de deformación inelástica co-sísmica es inversamente proporcional a la dimensión característica de la falla^{IV}. Es posible inferir que altos valores de energía liberada estarán relacionados con bajos valores de dimensión característica de falla y viceversa^V.

Dado esto, es posible introducir entonces la calidad del macizo rocoso, en términos de macizo competente, "duro", altamente confinado o intacto, o bien, poco competente, "blando", desconfinado o degradado. En el primer caso (roca competente) se espera que la roca esté sometida a altos esfuerzos locales de tal forma que una ruptura esté asociada con valores altos de energía radiada, por tanto, alta caída de tensión, mientras que en el segundo caso (roca poco competente) una ruptura tendrá asociado valores bajos de energía radiada, y así también baja caída de tensión^{VI}.

^I Stein & Wysession, 2003 ^{II} Belmonte, 2005 ^{III} Belmonte, 2005 ^{IV} Belmonte, 2005 ^V Belmonte, 2005 ^{VI} Belmonte, 2005

Frecuencia Esquina

Corresponde a la frecuencia predominante radiada desde la fuente (f_0) . Para una onda S en roca competente, f_0 se puede relacionar con el momento sísmico y la caída de tensión a través de la siguiente expresión¹:

$$f_0 = 1815 \sqrt[3]{\frac{\sigma}{M_o}} [H_z]$$
 (3.12)

Además se relaciona directamente con el tamaño del evento sísmico:

$$r_0 = \frac{KV_s}{2\pi f_0} \qquad K = 1,4 \tag{3.13}$$

con V_s velocidad de onda S y r_0 Radio de Brune.

El rango de frecuencia recomendado (ancho de banda) varía entre $\frac{f_0}{2}$ y 5 f_0 .

Radio de Ruptura

El radio de ruptura según el modelo de Brune estima el tamaño de la fuente sísmica:

$$r_0 = 2,34 \frac{V_s}{2\pi f_0} \quad [m] \tag{3.14}$$

donde V_s es la velocidad de la onda S y f_0 es la frecuencia esquina del espectro de frecuencias de los sismogramas. Además el parámetro f_0 marca una brusca caída en el contenido de frecuencias de la señal sísmica^{II}.

Magnitud

La magnitud de un evento sísmico usualmente mide la cantidad de energía radiada en forma de ondas elásticas, es decir, es un estimador del tamaño del evento, y numéricamente es adimensional.

La necesidad de comparar los "tamaños" de sismos y terremotos determinó la búsqueda de este parámetro, el cual permite su ordenación. La magnitud definida por Richter (1958):

$$M = \log A - \log A_0 \tag{3.15}$$

donde A es la amplitud registrada para un sismo determinado, por un instrumento específico, a una distancia dada del epicentro del evento. A_0 es la amplitud registrada para el mismo tipo de instrumento, a la misma distancia, para un sismo considerado patrón.

Si bien el concepto magnitud, se relaciona con la energía radiada por un sismo, este depende, entre otros factores, de las características instrumentales. Además, es un parámetro poco adecuado, ya que para caracterizar una ruptura se requieren conocer otros términos como: dimensiones geométricas de la ruptura y la energía radiada, es decir, es necesaria una descripción cualitativa del evento^{III}.

Considerando lo anterior, se optó por establecer una magnitud que se asociará directamente a un parámetro de la fuente con significado físico. Y por esta razón la magnitud se estima directamente a partir del momento sísmico (M_o) , y así entonces, es directamente proporcional al área de ruptura y

^I Mendecki, 1999 ^{II} Dunlop, 2001 ^{III} Dunlop, 2001

deslizamiento promedio sobre dicha área^I.

Los valores de magnitud son interpretados en la escala de Richter, y se representan por:

$$M = \frac{2}{3} \log M_o - 10,73 \qquad M_o \ en \ [dyn - cm]$$
(3.16)

Para los eventos registrados por el sistema instalado en la Mina, se usa como magnitud local, la magnitud Hanks-Kanamori o magnitud momento, definida por la siguiente expresión:

$$M_W = \frac{2}{3} \log M_o - 6.1 \qquad M_o \ en \ [N-m]$$
(3.17)

Donde M_o es el momento sísmico.

Tensor de momento

El tensor de momento busca una aproximación a la física de la fuente sísmica, supone que es puntual. Para esto, la fuente se aproxima por un sistema de fuerzas equivalentes, y de esta forma, los desplazamientos en el medio debido a las fuerzas equivalentes f^{II} , se pueden escribir como:

$$d(x,t) = \int \int G(x,t;r,t)f(r,t)dV(r)dt$$
(3.18)

donde G(x,t;r,t) es la función de Green del medio, las integrales son sobre la duración t de la fuente y sobre el volumen V de la fuente donde se definen esas fuerzas equivalentes.

Esta expresión puede simplificarse como:

$$d(x,t) = M_{kj}[G_{nk,j}s(t)]$$
(3.19)

Si la función de tiempo de la fuente s(t), se asume como una función delta, entonces el término entre paréntesis describe nueve cuplas (Figura 3.1), y M_{kj} las componentes de un tensor de segundo orden denominado tensor de momento sísmico^{III}.

a) Aproximación de Doble Cupla.

Para el caso de una ruptura que puede modelarse como un deslizamiento en las caras de un plano de falla, las fuerzas equivalentes en la fuente sísmica pueden modelarse como una doble cupla actuando en dos planos ortogonales^{IV}.

Para una aproximación de doble cupla, se pueden derivar los parámetros geométricos de un par de planos conjugados, llamados planos nodales, de entre los cuales podría seleccionarse el plano de ruptura más probable con alguna información, por ejemplo, información estructural en el volumen de ocurrencia del evento. Es posible representar los planos nodales mediante proyección en una red estereográfica en el hemisferio inferior^V. En la Figura 3.2 se muestran las proyecciones para tres casos de fallas más comunes.

b) Descomposición del Tensor

El tensor de momento sísmico, real y simétrico, puede descomponerse en una componente isotrópica y en una deviatórica^{VI}.

$$M = aS + bD = \frac{1}{3} \{ Tr(M)I + [M - \frac{1}{3}I] \}$$
(3.20)

¹ Dunlop, 2001 ^{II} Dunlop, 2001 ^{III} Dunlop, 2001 ^{IV} Dunlop, 2001 ^V Dunlop, 2001 ^{VI} Dunlop, 2001 20



Figura 3.1: Fuerzas equivalentes a la fuente sísmica.



Figura 3.2: Proyección de mecanismos focales.

Donde *a* y *b* son constantes, y Tr es la traza del tensor, *S* es la componente isotrópica, y se asocia a un cambio de volumen en la fuente, el cúal es producido por implosión o explosión, dependiendo del signo de la traza del tensor, y *D* es la componente deviatórica, este puede interpretarse como un movimiento de corte puro en el plano de falla más un movimiento residual¹.

c) Mecanismos de Eventos Inducidos y Tectónicos

Se ha planteado que los mecanismos de ruptura son similares tanto para los eventos téctónicos como para los eventos inducidos en minería. Sin embargo, existe una diferencia dada por la escala y la geometría de las rupturas^{II}.

En general, en sismicidad tectónica, un evento corresponde a la ruptura parcial de una discontinuidad geológica, o a la reactivación de una discontinuidad preexistente ya fallada, en la corteza superior terrestre. No se observan fenómenos asociados a los extremos de la ruptura que ocurran por el deslizamiento sólo en una porción de la discontinuidad donde la existencia de asperezas no han permitido un deslizamiento asísmico en la estructura. Luego, los mecanismos de ruptura corresponden en mayor grado a mecanismos mejor aproximados por rupturas planas con mecanismos de doble cupla^{III}.

^I Dunlop, 2001 ^{II} Dunlop, 2001 ^{III} Dunlop, 2001

Por el contrario, una ruptura a escala local en la mina, es un proceso que no se da aislado sino que forma parte de un proceso de formación de bloques, en particular para todos los procesos de ruptura que tienen lugar en el macizo sobre el nivel de hundimiento correspondiente a un sector de explotación. Esto significa que mientras una ruptura correspondiente a la formación de una cara de un bloque pudiera asociarse a un efecto de corte puro, al mismo tiempo se puede generar otra ruptura correspondiente a una cara adyacente a la anterior, que deberá tener una componente de extensión. Por lo tanto, esto podría reflejase, por ejemplo, en que los mecanismos en los eventos inducidos pueden tener con mayor frecuencia una componente isotrópica no despreciable, que en el caso tectónico no es tan común (**Figura 3.3**)¹.



Figura 3.3: Corte y extensión en formación de un bloque.

Índice de Energía

El Índice de Energía es un estimador de la caída de esfuerzos en la zona de ruptura del macizo rocoso^{II}. Para definir este parámetro, es conveniente introducir el término **esfuerzo aparente** σ_A^{III} , el cual se define por la expresión:

$$\sigma_A = \mu \frac{E}{M_o} \quad [Pa] \tag{3.21}$$

donde M_o es el momento sísmico, E corresponde a la energía radiada y μ es la rigidez del medio.

Esta expresión entrega una aproximación a las condiciones de esfuerzos en la zona donde se ubica la fuente sísmica. En efecto, una fractura en la que se produzca deslizamiento en una roca poco competente, con bajo nivel local de esfuerzos, tendrá valores bajos de energía radiada y altos de momento sísmico, lo que genera valores bajos de esfuerzo aparente. Por el contrario, en una roca competente, sujeta a altos esfuerzos locales, una fractura tendrá asociados valores más altos de energía radiada y menores de momento sísmico, produciendo valores más altos de esfuerzo aparente^{IV}.

Para independizar este parámetro respecto de las variaciones de momento sísmico, se desarrolló el parámetro **índice de energía adimensional**. Este se calcula como la razón entre la energía radiada

^I Dunlop, 2001 ^{II} Belmonte, 2011 ^{III} Dunlop, 2001 ^{IV} Dunlop, 2001

observada y la energía radiada esperada".

$$IE = \frac{E_{obs}}{E_{esp}}$$
(3.22)

Donde E_{asp} es la energía radiada esperada, la cual se calcula como la recta que mejor ajusta el conjunto de puntos formados por la energía radiada y el momento sísmico. E_{obs} es la energía radiada observada que se obtiene desde la Figura 3.4.



Figura 3.4: Definición del parámetro Indice de Energía.

Valores altos de índice de energía (IE > 1), indican una alta tasa de liberación de energía por unidad de deformación en la fuente, lo que se debe principalmente a la existencia de una roca competente, confinada, y con un alto nivel de esfuerzos. Mientras que valores sistemáticamente bajos (IE < 1), indicarán bajas tasas de liberación de energía por unidad geométrica del evento, debido a que la roca se califica como poco competente, desconfinada, y con bajos niveles de esfuerzos en la fuente¹¹.

Volumen Aparente

El volumen aparente, VA, es proporcional al volumen con deformación inelástica co-sísmica ocurrida entorno de la zona de ruptura del macizo, es decir, alrededor de la fuente sísmica¹¹¹.

Este parámetro está definido por la expresión:

$$VA = \frac{M_o^2}{2\mu E} [m^3] \qquad (3.23)$$

Donde Mo es el momento sísmico, E es la energía radiada y µ indica la rigidez del medio.

La utilización del volumen aparente (VA) cobra sentido cuando se introduce el concepto de condición de inestabilidad local. La energía de deformación acumulada dentro de un volumen se puede escribir como el producto entre el esfuerzo y la deformación^{TV}.

$$W = \int_{V} \sigma \tau dV \tag{3.24}$$

¹ Mendecki, 1997 ¹¹ Dunlop, 2001 ¹¹ Dunlop, 2001 ¹² Belmonte, 2005

Al introducir la condición de inestabilidad (**Ecuación 3.24**) y desarrollarla, se obtiene una relación en donde sus componentes están referidas a las variaciones temporales tanto del esfuerzo como de la deformación^I.

$$\frac{d^2W}{dt^2} < 0 \tag{3.25}$$

$$\frac{d^2W}{dt^2} = \int \underbrace{\frac{d\sigma}{dt}}_{IE} \underbrace{\frac{d\tau}{dt}}_{VA} < 0$$
(3.26)

La relación expuesta a través de la **Ecuación 3.26** indica que la condición de inestabilidad local se dará siempre y cuando las variaciones de los esfuerzos y deformaciones son en sentido contrario. En caso que se produzca una disminución de esfuerzos simmultáneamente, con un aumento de las deformaciones es interpretable como un estado de liberación de bajas energías, es decir, se hablará de un macizo en estado de fragmentación, desarme, "softening" o en fase de relajación. En caso contrario, sí se produce un aumento de los esfuerzos con disminución de la deformación, estará ligado a una condición en que el macizo acumula energía de deformación sin liberarla. Se hablará de un estado de endurecimiento, "hardening" o fase de activación ^{II}.

Ley Gutenberg-Richter

La ley Gutenberg-Richter corresponde a una curva (frecuencia-magnitud) la cual estima el número de eventos N, por cierta unidad de tiempo, con magnitud mayor o igual a un valor M dado^{III}, nos permite estimar una magnitud máxima para eventos ocurridos en un macizo sometido a una cierta condición de esfuerzo dada por la actividad minera.

$$log(N) = a - bM \tag{3.27}$$

a y b son constantes a determinar. El valor de b, es decir, la pendiente de la curva, se reconoce como **valor b** o **b-value**. El valor b se encuentra influenciado por las características geomecánicas del sistema en consideración, como la capacidad de resistir deformación "Stiffness", el estado de esfuerzos y la heterogeneidad de la masa de roca^{IV}.

3.1.3. Errores en los Parámetros de la Fuente

Los dos parámetros más comúnmente usados al caracterizar una fuente sísmica son el momento sísmico escalar y la energía radiada, pero las rutinas empleadas para su estimación son relativamente imprecisas. Esto se observa en la dispersión en los valores obtenidos para M_o y E en cada estación, a partir de los sismogramas registrados para un evento. La dispersión varía en un rango aproximado del 50% para formas de ondas bien definidas y en un 100% para formas complejas^V.

3.1.4. Parámetros de la Sismicidad

Se han desarrollado algunos parámetros que permiten caracterizar estadísticamente el "flujo sísmico" en el macizo, es decir, la evolución en el tiempo de la deformación del macizo hacia las cavidades generadas por la minería. Los parámetros básicos para esta caracterización son el esfuerzo y la deformación sísmica.

Deformación Sísmica.

La deformación sísmica τ estima la deformación co-sísmica acumulada en el volumen V durante un período t, que fue producida al momento de generarse el evento¹.

$$\tau(V, t) = \frac{\Sigma M_o}{2\mu V}$$
(3.28)

Esfuerzo Sísmico

El esfuerzo sísmico estima la variación de esfuerzo asociada a la ocurrencia de la actividad sísmica en un volumen V^{II} .

$$\sigma(V, t) = 2\mu \frac{\Sigma E}{\Sigma M_o}$$
(3.29)

Frecuencia de Eventos

La frecuencia de eventos FrEv es la tasa de ocurrencia de eventos y está ligado directamente a las actividades de extracción, socavación y/o apertura de bateas. Si la actividad sísmica se detiene, la FrEvdisminuye a valores cercanos a cero^{III}.

Estabilidad del Flujo Sísmico

La estabilidad del flujo sísmico permite analizar la estabilidad del macizo, para ello se definen otros parámetros en función de la deformación y esfuerzo sísmico.

La Difusividad Sísmica corresponde a un parámetro que representa la rapidez con la que el flujo de eventos sísmicos se propaga dentro de un volumen y período dado. La difusividad es inversamente proporcional a la viscosidad sísmica, esta última, representa la resistencia del macizo a la propagación de la deformación inelástica co-sísmica a partir de una fuente sísmica^{IV}. Estadísticamente la difusividad se expresa como una relación de la distancia promedio entre eventos consecutivos y el tiempo medio entre ellos.

$$d = \frac{X_p^2}{t_p} \ [m^2/s] \tag{3.30}$$

Valores bajos de viscosidad implican un flujo más dúctil de deformación sísmica inelástica y una mayor transferencia de esfuerzos asociados a la actividad sísmica.

Una extensión de la difusividad sísmica la constituye el denominado Número de Schmidt Sísmico (Sch), el cual es proporcional a la viscosidad e inversamente proporcional a la difusividad sísmica. El Número de Schmidt representa una estimación de la dispersión sísmica^v, corresponde a la complejidad espacio-temporal de la actividad sísmica (su grado de turbulencia)^{VI}.

¹ Dunlop, 2001 ^{II} Dunlop, 2001 ^{III} Belmonte, 2005 ^{IV} Belmonte, 2005 ^V Belmonte, 2005 ^{VI} Dunlop, 2001 25

3.1.5. Sismicidad Inducida Bajo un Método de Caving

Modelo de Macizo Rocoso y Método de Caving

Se han realizado varios estudios con el objetivo de definir un modelo de macizo que facilite el estudio de la mecánica del caving. En términos muy generales, y considerando también la práctica minera, se ha asumido un modelo que representa al macizo como un arreglo de bloques potenciales definidos por las discontinuidades geológicas presentes. Las características mecánicas de las estructuras, y de los puentes de roca, definirían la calidad del "pegamento" existente entre los bloques¹.

Globalmente, un método de Caving busca un desarme controlado de un volumen de macizo o sea de un arreglo potencial de bloques, partiendo por la destrucción (tronadura) de algunos bloques de la base del arreglo para crear la cara libre y la cavidad que posibilite la liberación y movimiento de otros bloques incluidos en el macizo del entorno de la cavidad creada^{II}.

La definición de los bloques efectivamente formados y sus posteriores movimientos dependerán de la condición estructural del macizo, como condición básica, y de la geometría de las cavidades generadas por la minería, es decir tiene directa relación con la socavación y extracción, las características mecánicas de las estructuras geológicas y de la matriz de roca, y de la geometría de esos bloques^{III}.

La gran mayoría de los bloques efectivamente formados tienen estructuras geológicas formando sus caras, apoyando el modelo de macizo y su desarme en términos de formación, liberación y movimiento de bloques de macizo^{IV}.

Fracturamiento del Macizo Rocoso

El desarrollo de una minería tipo Caving establece lograr un cambio de estado de volúmenes de macizo rocoso, desde una condición inicial de medio sólido hasta una condición final de material fragmentado, es decir, de un material intacto a uno degradado^V. La degradación del macizo corresponde a la disminución o pérdida de la calidad geotécnica original (in situ) provocada principalmente mediante el fracturamiento del macizo perturbado. El fracturamiento se produce mediante la apertura de fallas y vetillas selladas pre-existentes o por la generación de nuevas fracturas a través de la matriz de roca^{VI}. Desde el punto de vista de estado de esfuerzos, el macizo varía desde un estado altamente confinado a desconfinado^{VII}.

El cambio de estado del macizo se realiza mediante la creación de cavidades, tanto directamente por tronadura como por remoción de material fragmentado. Esta generación de cavidades provoca una perturbación en las condiciones de equilibrio del macizo que las circunda, macizo que se ve afectado por procesos de deformación y rupturas. Estos procesos generan movimientos de partes del macizo hacia esas cavidades, buscando el restablecimiento del equilibrio^{VIII}.

El proceso de reequilibrio genera una disponibilidad de energía potencial de deformación y por tanto rupturas en el macizo. La evolución y conexión de estas rupturas dan paso a un proceso de fracturamiento con el objeto de crear, a través de la fuerza de gravedad predominante, un flujo de material quebrado hacia los puntos de extracción, dado principalmente por movimientos verticales de partes de macizo^{IX}. El proceso de fracturamiento está formado por un conjunto de rupturas que liberan una cantidad de energía al medio circundante en forma de ondas elásticas.

¹ Dunlop, 2001 ^{II} Dunlop, 2001 ^{III} Dunlop, 2001 ^{IV} Dunlop, 2001 ^V Belmonte, 2005 ^{VI} Brzovic & Benado, 2003. ^{VII} Belmonte, 2005 ^{VIII} Dunlop, 2001. ^{IX} Belmonte, 2005



Figura 3.5: Propagación de Hundimiento hacia la superficie debido a la Extracción en minería por método de Hundimiento de Bloques.

Efecto Sísmico del Caving: Geometría del Caving y Sismicidad Inducida

La minería modifica las condiciones de equilibrio de un volumen de macizo rocoso en un entorno de la explotación, generando en este volumen, denominado *Volumen Activo*, un proceso de restablecimiento de las condiciones de equilibrio, que incluye procesos de deformación y ruptura del macizo rocoso.



Figura 3.6: Esquema descriptivo del método de Hundimiento. Se destacan volumenes de influencia, activo y de desplome.

Estos procesos se dan mayoritariamente a través de la ruptura de las discontinuidades geológicas existentes en el macizo primario. El resto se daría a través de la ruptura de *Puentes de Roca* de manera de unir rupturas generadas por discontinuidades geológicas^I.

En términos del modelo de macizo planteado, este proceso de deformación y ruptura del macizo se traduce en la formación, liberación y movimiento de bloques. El volumen activo sería el volumen de

^I Dunlop, 2001

macizo donde se genera el proceso de formación y liberación de los bloques que posteriormente formarán el material fragmentado que llegará a los puntos de extracción^I.

Dentro del proceso global de Caving, se pueden identificar algunos subprocesos:

- Proceso minero: incluye la socavación, extracción, apertura de bateas y todo otro proceso ligado a la pérdida de las condiciones de equilibrio del macizo. La interacción entre la minería y el macizo rocoso se produce básicamente a través de los cambios en la geometría minera y algunos efectos locales como la tronadura^{II}.
- Proceso de activación: proceso inducido por las fuerzas existentes y que resulta en la deformación y ruptura del macizo, dando lugar al volumen activo^{III}.
- Proceso de restauración: respuesta del macizo tratando de detener los movimientos inducidos por la activación, pudiendo ser elástica o irreversible como es el caso de las rupturas. La geometría del macizo y las propiedades mecánicas del macizo condicionan este proceso. En la práctica, la deformación y las rupturas terminan en las cavidades existentes. Un volumen de macizo restaurado implica que no se induce sismicidad en él^{IV}.

Los parámetros de la minería aplicada, o sea las geometrías del macizo rocoso definidas por esta minería y aquellas relacionadas, y las tasas de explotación, hundimiento extracción, apertura de bateas, junto con las características del macizo sujeto a explotación, su geometría global y condiciones geológicas estructurales, determinarán la geometría del volumen activo y su evolución en el tiempo. Es decir, definirán los procesos de ruptura y en consecuencia las características de la sismicidad asociada^v.

De esta forma, es posible plantear que un cambio en los parámetros de minería permiten modificar la respuesta del macizo sujeto a explotación, en particular su respuesta sísmica, posibilitando su conducción^{VI}.

Efecto Sísmico del Caving: Efecto en el Tiempo

Durante el desarrollo del caving en el macizo rocoso, es posible observar dos efectos temporales muy marcados. El primero es el efecto temporal incluido en los parámetros de la minería, es decir los ciclos mineros. El segundo efecto, son los tiempos de respuesta del macizo a la perturbación de sus condiciones de equilibrio generada por la minería^{VII}.

Ambos efectos, superpuestos, pueden ser observados en cualquier información incluida en la respuesta del macizo, por ejemplo en la frecuencia sísmica asociada a un área en producción. Las variaciones temporales de la frecuencia estarán determinadas tanto por las variaciones temporales de los parámetros mineros como por las características propias de la respuesta del macizo^{VIII}.

Ciclos en la respuesta del macizo.

Si se considera una cavidad generada por la minería, creciente en el tiempo, entonces los procesos de deformación y de ruptura del macizo en el entorno de la cavidad son tales que se producen movimientos de partes del macizo hacia la cavidad, siendo los de mayor relevancia los verticales, dado el efecto gravitacional^{IX}.

El motor del proceso lo constituye la actividad minera a través de la perturbación de las condiciones de equilibrio del macizo. La perturbación se traduce en la disponibilidad de energía para la deformación y

¹ Dunlop, 2001 ¹¹ Dunlop, 2001 ¹¹¹ Dunlop, 2001 ¹¹ Dunlop, 2001 ¹¹ Dunlop, 2001 ^V Dunlop, 2001 ^{VI} Dunlop, 2001 ^{VII} Dunlop, 2001 ^{VII} Dunlop, 2001

ruptura de éste, es decir para los movimientos de partes del macizo que buscan restaurar sus condiciones de equilibrio^I.

Para un determinado macizo, en una primera etapa se generarán todos los movimientos que impliquen fallamiento por tracción del macizo, en general por fallamiento de estructuras, por ser los de menor requerimiento de energía para su ocurrencia. En una segunda etapa, se producen aquellos de fallamiento por corte para finalizar con los que involucran compresión que comprometen los niveles mayores de energía en su generación^{II}.



Figura 3.7: Cavidad en un macizo y las direcciones principales de movimiento del macizo hacia la cavidad.

Al realizar un análisis más profundo de cada etapa, se puede establecer que:

 Para un macizo en un instante dado, el cual está en un estado de perturbación de su equilibrio, y por lo tanto con un cierto nivel de energía disponible para el restablecimiento de las condiciones de equilibrio, el orden descrito para la ocurrencia de la ruptura del macizo implica que, en una primera fase, los procesos de deformación y ruptura no podrán ocurrir en forma creciente en el tiempo. Su tasa de deformación será decreciente, hasta eventualmente detenerse, ya que se requieren niveles crecientes de energía para su ocurrencia y sólo se encuentran disponibles en el macizo, niveles decrecientes de energía, los cuales permitieron la deformación y ruptura del macizo^{III}.

Esta fase se denomina "activación (hardening)" del macizo rocoso. Los tipos de rupturas que efectivamente se produzcan en esta fase serán función de los niveles de energía disponibles para la ocurrencia de las distintas posibilidades de fallamiento del macizo involucrado. En términos de un modelo de bloques del macizo, esta fase es un proceso con una tasa decreciente de formación y liberación de bloques, resultando en un trabamiento cada vez mayor entre los bloques efectivamente formados^{IV}.

 En una segunda fase, la continuidad de la minería significa la continuación de los procesos de perturbación de las condiciones de equilibrio del macizo. Esto implica un incremento en los niveles de energía disponibles para la deformación y ruptura en el macizo perturbado. Por lo tanto, una vez ocurrida la situación de activación del macizo, y la desaceleración de los procesos de deformación y ruptura del macizo, y siempre de acuerdo a los niveles de energía disponibles en el macizo, se podrían producir nuevas rupturas, incluyendo el fallamiento de "puentes de roca". Es decir, una aceleración del proceso de deformación y ruptura del macizo^V.

^I Dunlop, 2001 ^{II} Dunlop, 2001 ^{III} Dunlop, 2001 ^{IV} Dunlop, 2001 ^V Dunlop, 2001 29

Esta fase se denomina "relajación (softening)" del macizo. En términos de bloques de macizo, este fallamiento significaría cambios en la geometría de bloques en proceso de formación y liberación y/o en la geometría y extensión de la cara libre, lo que permitiría retomar la formación liberación y movimiento de bloques que impliquen la continuación del proceso de fragmentación del macizo en bloques. De esta forma, se produciría la aceleración de los procesos de deformación y ruptura del macizo¹.

Estos ciclos de activación y relajación del macizo se repiten mientras continúe la minería, siendo esta el motor que genera la perturbación de las condiciones de equilibrio en ciertas partes del macizo, y por lo tanto produce movimientos en el macizo, generando deformaciones y rupturas^{II}.

^I Dunlop, 2001 ^{II} Dunlop, 2001

3.2. Metodología de Trabajo

3.2.1. Sistema Sísmico

El sistema de monitoreo sísmico fue instalado por primera vez en la Mina Río Blanco el año 2005 por la empresa GeoE-Tech en marco del proyecto IM2 y luego en el año 2010 fue renovado por la empresa Geoblast. El avance de la minería a lo largo del tiempo provoca la pérdida de los sensores que son instalados en la roca ya que ésta es fracturada y extraída, por esta razón es necesaria la renovación del sistema.

El sistema de monitoreo instalado el año 2010 en la Mina Río Blanco Nivel 16 de Hundimiento III Panel se encuentra formada por sensores (geófonos tri-axiales de 4,5 [Hz]) que transmiten la información de los eventos sísmicos en forma de una señal eléctrica análoga a un sismómetro (QS o SAQS), cuya función corresponde en realizar la digitalización de la señal a diferentes frecuencias de muestreo, para luego enviarla a través del cableado hacia el computador central ubicado en El Barrio Civico Nivel 17 donde se almacena y se hace el posterior análisis de los datos.

La figura a continuación replica la distribución de los sensores en el Nivel 16 Hundimiento.



Figura 3.8: Distribución de los geófonos. A: Vista hacia Norte. B: Vista hacia Este. C: Vista en planta. D: Detalle de la ubicación en Nivel 16 (Tomado de Informe de Práctica "Procesamiento y Análisis de Información de Sistema de Monitoreo Sísmico", 2011).

Estación	Este [m]	Norte [m]	Cota [m]
Site41	23116	27712	3265
Site42	23064	27690	3280
Site43	23064	27690	3300
Site44	23003	27652	3271
Site45	22971	27589	3306
Site46	22993	27544	3260

En la **Tabla 3.1** se muestran las coordenadas de los sensores que forman la red de monitoreo:

Tabla 3.1: Coordenadas mina de las estaciones sísmicas año 2010.

Los sismómetros instalados corresponden a tres QS (Quake Sismometer) y una SAQS (StandAlone Quake Sismometer) desarrollados por IMS (Institute of Mine Seismology). La **Figura 3.9** corresponde al "layout" del sistema sísmico desde los simómetros. Los sismógrafos envían la información hacia la Broquera donde se encuentra la estación MR232/485 y unidad Equinox conectados a un servidor que se encuentra en la oficina de Geomecánica en el Barrio Cívico del Nivel 17 para el posterior procesamiento de los eventos.



Figura 3.9: Diseño del sistema de monitoreo Noviembre 2010 (Tomado de Informe Técnico "Servicio de Instalación y Conexión de Geófonos en Nivel 16 Hundimiento Mina Subterránea", 2010).

En términos generales, el funcionamiento de la red de monitoreo ha sido un tanto complicado. Luego de su instalación, se logró rescatar un período de tiempo no continuo comprendido entre 7 de Octubre y 30 de Noviembre del año 2010. Durante éste período de tiempo, a pesar de ser corto, se registraron una cantidad considerable de eventos sísmicos, con una diferencia importante entre Octubre y Noviembre.

Actualmente, la red de monitoreo instalada en el 2010 no se encuentra operativa debido al avance de la actividad minera, sin embargo, durante el año 2011 se instaló una nueva red de monitoreo formada por 10 sensores que se planifica se mantenga en funcionamiento desde fines de 2011 hasta parte del 2012 según la planificación del avance de las faenas.

3.2.2. Descripción del Software a Utilizar

Para parte del procesamiento de la información sísmica se utilizaron tres softwares de procedencia *IMS*; los softwares Jmts, Jdi y V4d. El primero corresponde a un programa de análisis de señales sísmicas, su función, entre otras cosas, responde a la visualización de las formas de onda de los eventos capturados por los sensores sísmicos (Geófonos) para realizar lo que se denomina "picado", que corresponde a la confirmación manual del tiempo de llegada de las fases P y S a cada uno de los sensores que registran un evento sísmico. El objetivo principal del picado de ondas es obtener con el menor error posible tanto la localización como la magnitud de los eventos registrados por los sensores. El programa incluye herramientas de análisis espectral, polarización de las formas de onda, cálculo del tensor de momentos y mecanismo de foco, además de diferentes filtros digitales que nos permiten una mejor visualización de los registros sísmicos.



Figura 3.10: Visualización de evento en software Jmts.

El segundo corresponde a un programa de visualización de la información sísmica, su función es permitir observar tanto la localización de los eventos sísmicos como la distribución en el tiempo y en el espacio de distintos parámetros sísmicos, entre otras cosas nos permite aplicar filtros espaciales y temporales a la ocurrencia de sismicidad en diferentes sectores, implementar planos en formato AUTOCAD de los diferentes niveles de la mina y estimar la ubicación de las fallas, contacto primario-secundario, etc.

Por último, el tercer software V4d es un visualizador sísmico-minero desarrollado en el marco de un proyecto del IM2 del año 2009 denominado "Internalización del sistema de monitoreo sísmico, División Andina". Este visualizador, a diferencia de Jdi, permite relacionar la actividad sísmica con variables mineras, como lo son; evolución del frente de socavación y extracción, fallas mayores, litología e infraestructura. La evolución de estas variables pueden ser visualizadas junto a la sismicidad ocurrente.

Otro software a utilizar corresponde a MATLAB con el que se desarrollaron diferentes rutinas para analizar la información de los catálogos sísmicos así como de las formas de onda registradas por los instrumentos.

3.2.3. Procesamiento y Análisis de los Datos

Procesamiento de Catálogos Sísmicos

El procesamiento de la información sísmica comienza con el "picado" (reconocimiento manual de los tiempos de llegada de las fases P y S) utilizando el software Jmts. Cada uno de los eventos registrados por los sensores son procesados de manera manual en cada uno de los días comprendidos entre el 17 y 30 de Noviembre de 2010. La variabilidad de registros capturados por los sensores requiere un procedimiento de validación relacionado al error en su localización, que se describe en la **Tabla 3.2**.

Condición del Error	Resultado
Residual: bajo (< 5%) Error esperado: bajo (< $5[m]$)	Resultado consistente, se acepta
Residual: bajo (< 5%) Error esperado: alto (> $5[m]$)	Resultado no confiable, se rechaza
Residual: alto (> 5%)Error esperado: bajo (< $5[m]$)	Se intenta mejorar el picado de fases P y S

Tabla 3.2: Criterio de aceptación de eventos, interpretación de error residual y esperado.

El error residual hace relación a un porcentaje de tolerancia estimado a partir del valor medio de las distancias entre cada uno de los sensores que registran el evento y el hipocentro del evento en cuestión, mientras que el error esperado se refiere al error estimado usando la **Ecuación 3.1** descrita anteriormente.

Posterior al "picado" y clasificación de cada uno de los registros sísmicos se procede a crear un catálogo donde se resume toda la información requerida para cada evento sísmico aceptado como tal. El catálogo es creado en formato estandar ASCII con extensión .evp a partir del software Jmts (**Tabla 3.3**).

Columna	Variable
1	Fecha (yyyymmdd)
2	Hora (hhmmss)
3	Error de Localización [m]
4	Coordenada mina X $[m]$
5	Coordenada mina Y $[m]$
6	Coordenada mina Z $[m]$
7	Momento [Nm]
8	Energía $[J]$
9	Momento P $[Nm]$
10	Energía P $[J]$
11	Momento S [Nm]
12	Energía S $[J]$
13	N° de Trigger
14	Frecuencia Esquina [Hz]
15	Caída de Esfuerzo Estático [Pa]
16	Caída de Esfuerzo Dinámica [Pa]
17	Desviación de Momento [Nm]
18	Desviación de Energía $[J]$

Tabla 3.3: Contenido del catálogo de eventos sísmicos .evp.

Una vez obtenido el catálogo se utilizaron los softwares visualizadores para verificar que la localización fuese consistente con la ubicación de las labores mineras, para el caso del visualizador Jdi el catálogo de eventos se exporta directamente en el software, en el caso del visualizador minero, es necesario un formato especial en cuanto a "acomodar" ciertos parámetros, paso que se realizó generando una rutina en lenguaje MATLAB que crea de forma automática el formato necesario a partir del catálogo original .evp. Posteriormente se realizaron filtros espaciales para separar los eventos en tres grandes polígonos; Polígono Norte, Polígono Centro y Polígono Sur, cada uno con su catálogo correspondiente en formato .evp estándar.

Para el cálculo de parámetros sísmicos se desarrollaron rutinas numéricas que automatizaron el proceso en base a las ecuaciones antes mencionadas. Con el objeto de una correcta representación de los parámetros sísmicos se utilizó una media movil correspondiente a una ventana temporal de longitud igual a un turno (8 [hrs]) haciendo promedios de los valores de cada parámetro en tal intervalo temporal con el fin de eliminar la fluctuación de alta frecuencia de la serie.

Análisis de Sismogramas: Clasificaciones

Para realizar la clasificación de eventos según características de la señal se observaron 387 sismogramas registrados por los sensores, no se discriminó entre registros aceptados o rechazados.

De manera de facilitar la clasificación se realizó el filtrado de las señales utilizando el filtro digital Butterworth High-Pass con número de peso N = 15 y frecuencia de corte $f_c = 300 [Hz]$ para eliminar la baja frecuencia de la señal que la contamina y dificulta su visualización. En la **Figura 3.11** se indica la elección del número de pesos en función del rango de frecuencias que se desea eliminar.



Figura 3.11: Características del filtro Butterworth High-Pass utilizado.

Para clasificar las señales en los diferentes grupos que muestran patrones diferenciados se utilizó La Transformada de Hilbert para obtener la envolvente de la señal y un Espectrograma Wavalet Normalizado usando como wavelet madre una de tipo Morlet. En este caso el intervalo t se considera como variable y propio de cada uno de los sismogramas dependiendo de su frecuencia de muestreo, las que varían entre 6000-3000 [*Hz*].

Para realizar la clasificación según distribución espacial se observaron 225 sismogramas entre los eventos ACEPTADOS distribuidos en 105 sismogramas para el sector Norte, 105 sismogramas para el sector Centro y 15 sismogramas para el sector Sur.

Esta clasificación parte con la hipótesis de pensar que las características que poseen los sismogramas podrían tener diferencias significativas entre los tres diferentes sectores.

Luego de la revisión de cada uno de los sismogramas se seleccionó el evento más representativo de cada sector. Para cada Geófono a partir de la diferencia de tiempo en las fases P y S ($t = t_S - t_P$) se estimó la distancia a la cual se encuentra el epicentro del evento considerando el modelo de velocidad usado por IMS ($V_P = 5600 \ [m/s] \ y \ V_S = 3500 \ [m/s] \ y$ una disminución del 8% en un macizo sometido a actividad minera) y una aproximación de campo cercano que implica asumir que las ondas sísmicas se propagan en línea recta desde la fuente hacia el entorno.

3.2.4. Descripción Método de Picado

El procedimiento establecido de picado de registros sísmicos es bastante sencillo, pero existen ciertos aspectos necesarios a tener en consideración.

Dentro de la interacción dinámica entre la actividad minera y el macizo rocoso existen diferentes ciclos establecidos, por una parte tenemos los ciclos temporales propios de la minería, sean; Hundimiento, Socavación y Extracción y el ciclo de respuesta del macizo a la perturbación de sus condiciones de equilibrio, que claramente no es instantánea.

Si consideramos ambos fenómenos superpuestos, estos son observables en la respuesta del macizo, particularmente en la frecuencia sísmica asociada a un área de producción. Las variaciones temporales de las frecuencias estarán determinadas tanto por las variaciones temporales de los parámetros mineros, como por las características propias de la respuesta del macizo^I. Considerando lo anterior, establecer un método de procesamiento de eventos implica replicar qué parámetros están mayoritariamente ligados a condiciones mecánicas particulares del macizo perturbado.

Dentro de un volumen de macizo influenciado por la minería existe ocurrencia de un gran número de registros de señales (Sismogramas), donde podemos distinguir tres grandes grupos; tronaduras, señales extrañas y claros eventos sísmicos. Cualquiera sea el caso, un gran número de registros, en promedio 700 en un día de catálogo, resulta una gran dedicación de tiempo en cuanto a su localización (picado de fases P y S) y discriminación, si consideramos que una persona entrenada demora en promedio 3,5 a 4 minutos en localizar y discriminar un registro donde se podría suponer claras llegadas de ambas fases P y S o fácil discriminación entre grupos, le tomaría 46,67 horas, casi 2 días, en procesar sólo un día de registros sísmicos.

La observación de un drástico aumento de registros sísmicos entre Octubre y Noviembre del año 2010 por parte de la red de monitoreo micro-sísmico de la División, hace necesario el desarrollo de una técnica que nos permita considerar una muestra representativa dentro de los registros sísmicos para ser procesada, que tenga el menor impacto posible en el análisis posterior de los datos y en los resultados.

El método de picado y clasificación de registros sísmicos consiste en procesar un número reducido de registros. Consideremos un número de registros estándar y un máximo $N_{evmax} = 450$ que deberíamos obtener en un catálogo de un día de registros según el nivel de monitoreo mina. Establecemos picar sólo una quinta parte de N_{evmax} , lo que corresponde a 90 registros aceptados como eventos sísmicos, distribuidos a lo largo de todo el día de catálogo en un día de trabajo que nos tomará en promedio 6 hrs. diarias de trabajo dedicado al picado de ondas.

Si el número de registros en un día de catálogo es menor a N_{evmax} consideraremos picar la quinta parte nuevamente, y en este caso podremos continuar al siguiente día de catálogo hasta completar los 90 eventos aceptados en un día de trabajo.

Si el número de registros en un día de catálogo es mayor a N_{evmax} consideraremos picar sólo 90 eventos considerados como aceptados distribuidos a lo largo de todo el día de catálogo y a lo largo de todo el día de trabajo.

Debemos notar que considerar 90 eventos aceptados como eventos sísmicos no es igual a considerar 90 registros en un día de catálogo, ya que en los registros del catálogo se encuentran eventos que no corresponden a eventos sísmicos, tales señales pueden corresponder a diversos tipos de señal. Por lo tanto, en un día de trabajo se revisan tantos registros sean necesarios hasta completar 90 registros aceptados como eventos sísmicos.

^I Dunlop, 2001.

Para validar el uso de este método de picado de datos es necesario hacer una comparación de los resultados obtenidos al usar una muestra, frente a la totalidad de eventos dentro del catálogo de datos. Para esto es necesario determinar la evolución espacio-temporal de parámetros sísmicos verificando su tendencia de variación y correlación comparando los resultados obtenidos usando la muestra y el total de los eventos procesados, con el fin de verificar hasta que punto es crítico contar con un catálogo completo de eventos.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Comparación Método de Picado de Eventos Sísmicos

El número de registros en el mes de Octubre y Noviembre se resumen en la Tabla 4.1 donde se observa un claro aumento, la media de registros diarios aumenta desde 238 en el mes de Octubre a 740 registros diarios en el mes de Noviembre. Según la ocurrencia de la sismicidad se analizan 4 diferentes sectores; Global, Sectores Norte, Centro y Sur.

Los resultados se enmarcan en cuantificar la variación de los siguientes parámetros sísmicos que son usados para analizar la información sísmica caracterizando la evolución del macizo frente a la actividad minera. Los parámetros analizados son: Índice de Energía (*IE*), Ley Gutenberg-Richter (*Ley G - R*), Volúmen Aparente Acumulado (*VAA*), Radio de Brune (*RB*), Difusividad Sísmica, Frecuencia Sísmica, Razón E_S/E_P y la distribución espacial según Magnitud (*M*_W).

El método de picado se comienza a aplicar a partir del día 21 de Noviembre de 2010.



Figura 4.1: Diferentes sectores de sismicidad, se observan 3 sectores; sector Norte (verde), sector Centro (azul) y sector Sur (blanco), además del volumen Giobal.

Días del Mes	Nro. Registros	
	Octubre	Noviembre
1	-	-
2	-	-
3	-	-
4	-	-
5	-	-
6	-	-
7	118	-
8	210	-
9	169	-
10	183	-
11	192	-
12	224	-
13	192	-
14	154	-
15	170	-
16	141	-
17	152	528
18	143	877
19	254	1009
20	653	879
21	762	1182
22	421	718
23	320	592
24	222	612
25	263	523
26	147	357
27	106	526
28	362	1384
29	159	628
30	201	547
31	146	-
Total	5964	10362
MEAN	238,56	740,14
STD	160,34	290,04

Tabla 4.1: Número de registros en cada día de catálogo meses de Octubre y Noviembre de 2010.

En la mayor parte del análisis de los parámetros se identificaron sub-intervalos temporales resumidos en la **Tabla 5.2**. La interpretación de los resultados se enmarca en términos de analizar las variaciones de los parámetros sísmicos obtenidos y correlacionar estas variaciones con el número de registros procesados en cada caso. El análisis se realiza desde un punto de vista global donde pequeñas fluctuaciones locales de algunos parámetros que no marquen tendencia no serán consideradas relevantes. Se considera como significativa una correlación cuyo índice sea mayor a $r \ge 0.5$.

Sub-intervalos Considerados				
Nro. Tramo	Intervalo Temporal			
	Inicio Fin			
1	17 Nov 00:00	20 Nov 15:59		
2	20 Nov 16:00	23 Nov 15:59		
3	23 Nov 16:00	25 Nov 15:59		
4	25 Nov 16:00	28 Nov 15:59		
5	28 Nov 16:00	30 Nov 23:59		

Tabla 4.2: Identificación sub-intervalos temporales.

4.1.1. Distribución Según Magnitud

Globalmente, en ambos casos, los eventos se alojan en los mismos sectores identificando pequeñas diferencias en la cantidad de eventos en cada sector.



Figura 4.2: Distribución espacial según Magnitud M_W All. Figura 4.3: Distribución espacial según Magnitud M_W Sample.

El picado previo de los eventos sísmicos usando una muestra de registros entrega las líneas donde se alojaran los eventos provenientes de la totalidad de los registros procesados. Se debe hacer notar que utilizando el método de picado se pierde la distribución de las magnitudes en algunos sectores como indica la **Tabla 4.3**, que puede resultar importante a la hora de relacionar las características de la sismicidad de la distribución en magnitud de la actividad minera. La pérdida, en cierta medida, de la distribución local en la que se encuentre el macizo según éste sea perturbado.

Número de eventos según magnitud M_W				
Registros	Distribución M _W			
	$-3 \le Mw < -2 -2 \le Mw < -1, 5 -1, 5 \le Mw < -1 -1 \le Mw \le 0$			
All	784	1099	695	252
Sample	317	662	472	232
	Total			
All	2830			
Sample	1683			
	Contribución			
All	27,8%	38,8%	24,5%	8,9%
Sample	18,8%	39,4%	28%	13,8%

Tabla 4.3: Número de eventos sísmicos según magnitud M_W .

4.1.2. Índice de Energía y Volúmen Aparente

En una visión global, para la totalidad de los sectores, las variaciones de *IE* tienen las mismas tendencias tanto procesando la totalidad de los registros como una muestra en cada caso, inclusive la magnitud del índice se considera casi invariante.



Figura 4.4: Sector Global; *IE* obtenido usando la totalidad de los registros (azul), *IE* obtenido usando la muestra (verde), diferencia (rojo) y tendencia lineal en ambos casos. Ejemplo de comportamiento del parámetro.

Sin embargo, existen algunas alteraciones locales en el índice que claramente son visualizadas mediante la curva de color rojo en la figura, las que ocurren de forma más marcada, en el tercer tramo (intervalo 23/16h-25/16h). Esta variación local se relaciona a la configuración casi aleatoria de la selección de la muestra en cada hora del día de registros, si bien se considera picar dentro de cada hora de registro una quinta parte, la selección de los eventos se realizó considerando aquellos registros que poseían formas de ondas mejor definidas, de tal forma de demorar un menor tiempo en su picado, que podríamos considerar como los "mejores eventos" resaltando de esta forma algunas propiedades de la señal. Por otra parte debemos tener presente que los datos del catálogo una vez aceptados, tanto para la totalidad de los registros como para la muestra, fueron reducidos haciendo promedios cada 8 horas (un turno). Este procedimiento pudo, de cierta manera, degradar la calidad de la señal en el caso de procesar la totalidad de los registros. Al calcular la media de *IE* para cada evento para reducir el número de datos podríamos decir que los eventos "mejor localizados y de mejor calidad de señal" fueron afectados por aquellos de "menor calidad" pero aceptados según el estándar del procedimiento.

Tendencias IE Global e Ind. Correlación				
Tramo	All	Sample	Dif.	Ind.
1	0,0097	0,0087	0,0010	1
2	-0,0281	-0,0448	0,0167	0,9623
3	0,0202	-0,0167	0,0369	0,7342
4	0,0934	0,0829	0,0105	0,9771
5	-0,0785	-0,0759	0,0026	0,8622

Tabla 4.4: Tendencias por tramo e Índice de Correlación All v/s Sample Global.

Lo importante a destacar es el hecho que en cada sector la señal que indica la diferencia (línea roja) oscila en torno al cero, lo que señala que la variación del índice en ambos casos sigue un mismo patrón, esto para efectos del estudio, se considera satisfactorio.



Figura 4.5: Sector Global; *VAA* usando la totalidad de los registros (azul), *VAA* usando la muestra (verde) y diferencia (rojo). Ejemplo de comportamiento del parámetro.

El volúmen aparente es una representación del volúmen de deformación inelástica cosísmica en el macizo rocoso, relacionado directamente con el tamaño de la ruptura en la fuente, por tanto, es sensible al número de eventos sísmicos registrados en el volúmen de macizo. Por esta razón, utilizar un método de picado donde en general se consideren una menor cantidad de registros sísmicos hace que perdamos información con respecto a las variaciones locales del índice.

Variaciones locales del volúmen aparente, es decir, incrementos paulatinos o bruscos nos entrega información espacial y temporal relativa al ciclo en el cuál se encuentra el macizo (confinamiento proceso generalmente local o desarme proceso generalmente global) que explica su respuesta sísmica ante las perturbaciones dinámicas por parte de la actividad minera, tales ciclos se identifican mediante el aumentando o disminución en la ocurrencia de deformación inelástica en función de la energía requerida.

4.1.3. Ley Gutenberg-Richter G - R

Mediante la curva G - R se estima una margnitud máxima esperable para eventos sísmicos ocurridos en un volumen de roca dada una condición de estrés particular.



Figura 4.6: Ley G-R usando todos los registros para los 4 sectores. $M_W = 0.19$ máxima con b - value = -1.6322. **Figura 4.7:** Ley G-R usando una muestra de los registros para los 4 sectores. $M_W = 0.25$ máxima con b - value = -1.5115.

Para ambos casos las curvas ajustadas para cada sector son bastante similares. Si consideramos la diferencia en los porcentajes de contribución de eventos sísmicos de diferentes magnitudes en ambos casos (**Tabla 4.3**) encontramos que el impacto en la Ley G - R es muy pequeño, esto lo podemos observar en la pendiente de la curva ajustada y el b - value en ambos casos, además de la magnitud máxima estimada a partir del ajuste. Un valor b - value = -1,55 promedio ajustado con una magnitud de corte $M_W = -2,2$ entrega una $M_{Wmax} = 0,22$ promedio que parece ajustarse bastante bien en ambos casos, lo que indica que las curvas poseen un similar comportamientos no viéndose influenciado, en gran medida, por el número de eventos utilizado. Debemos notar que en ambos casos las curvas admiten el ajuste de una segunda recta utilizando una magnitud de corte menor donde las curvas se hacen paralelas al eje de las abscisas. En este caso, como el número de eventos total marca una diferencia en el número de eventos de menor magnitud, podríamos tener una diferencia más marcada en cuanto a un b - value y magnitud máxima estimada por el ajuste, sin embargo, este ajuste estimaría una magnitud máxima no observable en los eventos sísmicos.

4.1.4. Radio de Brune

El Radio de Brune corresponde al tamaño de la fuente sísmica considerada como una dislocación cinemática ubicada en su totalidad en el plano de falla, considerando esto, este índice es bastante sensible al cambio en momento sísmico entre eventos.



Figura 4.8: Sector Global; *RB* usando la totalidad de los registros (azul), *RB* usando la muestra (verde), diferencia (rojo). Ejemplo de comportamiento del parámetro.

Variación RB Global e Ind. Correlación				
Tramo	MEAN	STD	Ind.	
1	0	0	1	
2	-0,1983	0,7040	0,8355	
3	-1,3083	1,1515	-0,1773	
4	-0,3578	0,7281	0,9276	
3	-0,0288	0,2428	0,9701	
Extremo				
3	-1,3083	1,1515	-0,1773	

Tabla 4.5: Estadística de la variación RB e Índide de Correlación All v/s Sample Global.

Consideremos las figuras **Figura 4.13**, **Figura 4.14** y **Figura 4.15** se observa que se pierde bruscamente la proporción entre la totalidad de los eventos sísmicos y la muestra en un período de tiempo comprendido entre los días 24 y 27, particularmente, en los días 26 y 27, los que corresponden a los días de menor cantidad de registros dentro del catálogo. El número de eventos aceptados usados como muestra resulta ser casi la totalidad de los eventos aceptados usando todo el registro de eventos. Sin embargo, no se observa una clara relación entre tales variaciones en el número de eventos en cada día con la variación en el parámetro, lo que hace pensar que el *RB* atiende condiciones más bien estructurales del macizo y sus variaciones con respecto a procesos de desarme a través de sistemas de fallas o rupturas en matriz de roca.

4.1.5. Difusividad Sísmica

La difusividad representa una medida de la migración de la actividad sísmica en el macizo rocoso. Es sensible a eventos sísmicos consecutivos; a la distancia entre ellos y su espaciamiento en tiempo.



Figura 4.9: Sector Global; Dif. usando la totalidad de los registros (azul), Dif. usando la muetra (verde), diferencia (rojo). Ejemplo de comportamiento del parámetro.

Variación Dif. Global e Ind. Correlación				
Tramo	MEAN	STD	Ind.	
1	0	0	1	
2	5,5811	25,5702	0,7305	
3	25,3144	23,3545	-0,2033	
4	37,3205	53,3797	0,0189	
5	19,7408	17,5311	-0,0362	
Extremo				
4	37,3205	53,3797	0,0189	

Tabla 4.6: Estadística de la variación Difusividad e Índide de Correlación All v/s Sample Global.

Generalmente, la magnitud de la difusividad sísmica es menor para la muestra de eventos que para el total, lo que es esperable, ya que la muestra de eventos sísmicos usados en la mayoría de los casos se encuentran distribuídos a lo largo de todo un día de registros, haciendo que la separación temporal sea

grande. Sin embargo, existen algunos casos puntuales donde al parecer la distribución espacial fue mayor a la temporal haciendo que localmente el índice fuese de mayor magnitud que el obtenido a partir de todos los registros sísmicos. A priori, no podríamos evitar esta diferencia en magnitudes, que resulta propio producto del método establecido. Al realizar una selección aleatoria del registro a procesar según dicta el método de picado se modifica completamente el espaciamiento temporal entre eventos consecutivos, lo que induce una modificación completa del parámetro.

Frecuencia Sísmica y Razón E_S/E_P 4.1.6.

El valor acumulado de la frecuencia sísmica no muestra cambios generales importantes, se conserva la proporción de números de eventos en cada sector para ambos casos.



Figura 4.10: Frecuencia Sísmica Acumulada obtenida a partir Figura 4.11: Frecuencia Sísmica Acumulada obtenida usando de la totalidad de los registros para los 4 sectores.



una muestra de los registros para los 4 sectores.



Figura 4.12: Número acumulado de eventos sísmicos aceptados Figura 4.13: Comparación número de eventos por día All v/s en cada hora del día All v/s Sample.

Sample.

Sin embargo, existen pequeños cambios locales relevantes, como el aumento de la actividad sísmica en algún día determinado, este efecto propio del método, nos hace perder información valiosa con respecto a algún fenómeno inportante que sea el gatillante del aumento en la actividad sísmica en un intervalo de tiempo dado que podemos visualizar graficamente en el suavizado de la curva de la Figura 4.11 con respecto a la Figura 4.10, como podría ser un control estructural, efecto dinámico, estado del macizo





Figura 4.14: Número de eventos por día sector Norte All v/s Figura 4.15: Número de eventos por día sector Centro All v/s Sample.



Figura 4.16: Número de eventos por día sector Sur All v/s Sample.

o activación de alguna falla, que traiga consigo aumentos propios en la sismicidad tanto espacial como temporal.

Es importante señalar que el aumento en el número de eventos sísmicos presente en los primeros 4 días de la **Figura 4.11** no guarda relación con algún fenómeno estructural o dinámico mencionado anteriormente, esto se debe a que el método de picado de eventos comenzó a realizarse después del día 21 de noviembre, a esto se debe el cambio en la pendiente de la curva.

Con respecto a la distribución de eventos diaria según la **Figura 4.12** y la **Tabla 4.7** vemos que existe buena relación entre el método y el total de los registros, en ambos casos se observan máximos en número de eventos entre las 7 a 8 hrs. y 19 a 20 hrs seguida por una caída paulatina que está relacionada con las condiciones de re-equilibrio que busca el macizo posterior a las perturbaciones dinámicas producidas por los polvorazos que se realizan por lo general entre las horas 7 : 50 a 8 : 00 hrs. y 19 : 50 a 20 : 00 hrs. del día. Esto lo podemos verificar con el valor del índice de correlación.

Considerando los índices de correlación entre el número de eventos usando el método y el total para el Cluster Norte y Global, estos presentan una distribución de eventos que no oscila en forma armónica, lo que era de esperar para el Cluster Global. En relación al Cluster Centro, aunque el índice de correlación

Correlaciones eventos diarios por Cluster			
Cluster	Correlación		
Norte	0,4768		
Centro	0,5901		
Sur	0,9768		
Correlaciones eventos por hora			
Global	0,7400		

Tabla 4.7: Correlaciones Frecuencia Sísmica.

sobrepasa la barrera de la significancia, se puede observar que también presenta anomalías importantes en cuanto a proporción de eventos y tendencias. Lo descrito anteriormente es producto a que sólo uno de los días del mes de Noviembre tenía un total de registros bajo en valor máximo establecido por el método, haciendo que en los días restantes siempre se aceptaran el número máximo de registros establecidos en un día de trabajo, perdiendo toda proporción con el número real de registros aceptados procesando todos los registros sísmicos.



Figura 4.17: Sector Global; Razón E_S/E_P obtenido a partir de la totalidad de los registros (azul), E_S/E_P obtenido usando la muetra (verde), diferencia entre ambos (rojo). Ejemplo de comportamiento del parámetro.

Las grandes variaciónes en el índice Razón E_S/E_P ocurren mayormente en magnitud más que en tendencia, y es precisamente ésta magnitud la que indica el control de una geometría particular de la fuente sísmica con respecto a otra.

Variación E_S/E_P Global e Ind. Correlación				
Tramo	MEAN	STD	Ind.	
1	0	0	1	
2	32,4163	58,7472	0,9054	
3	30,0303	49,2156	0,7523	
4	70,8888	88,1195	0,7559	
5	-6,8957	19,5318	0,9884	
Extremo				
3	70,8888	88,1195	0,7559	

Tabla 4.8: Estadística de la variación E_S/E_P e Índide de Correlación All v/s Sample Global.

4.2. Clasificación de Eventos Sísmicos

4.2.1. Clasificación Según Características de la Señal

Registro Aceptado



Figura 4.18: Señal registrada en Geófono Tri-axial 4,5 [Hz] Fecha: 19/11/2010 Hora: 15:56:41 Site: 44 componente Norte-Sur (superior), Este-Oeste (intermedia) y Vertical (inferior). Tipo de registro claro con componetes frecuenciales definidas.

El registro de la **Figura 4.18** muestra características específicas en cuanto a forma y componentes frecuenciales que lo forman. La señal presenta una forma bien definida donde resulta clara la llegada de las fases P y S con un intervalo de tiempos bien definidos entre fases. Posterior a la llegada de la fase S se observa un rápido decaimiento de la señal haciendo que el registro no tenga una duración más allá a dos a tres centécimas de segundo.

En cuanto a las componentes frecuenciales que forman el registro se puede observar un claro dominio de alta frecuencia propia en un registro de corta duración, donde se identifica una frecuencia clara (alrededor a 2500 [Hz]) en torno a la cual la banda de frecuencias dominante se alberga. Se observa una casi nula contribución de baja frecuencia en el registro.

Registro Ocasionalmente Rechazado



Figura 4.19: Señal registrada en Geófono Tri-axial 4,5 [Hz] Fecha: 21/11/2010 Hora: 22:18:47 Site: 45 componente Norte-Sur (superior), Este-Oeste (intermedia) y Vertical (inferior). Tipo de registro sin forma definida, las fases P y S se logran distinguir con un poco de dificultad y su espectrograma característico muestra componentes frecuenciales variables.

El registro de la **Figura 4.19** corresponde a un tipo de señal un tanto complicada desde el punto de vista frecuencial. En este contexto, la señal se encuentra compuesta por un amplio rango de frecuencias $(200-2000 \ [Hz])$ las cuales aportan a la señal total en cantidades comparables de energía. Resulta difícil caracterizar el registro de manera de adjudicarle una frecuencia característica dado que ésta "posible frecuencia característica" se encuentra acotada en un rango mayor de frecuencias. Este tipo de señal parece corresponder a un registro similar al caso anterior, que se encuentra diseminado a través de un intervalo temporal mayor (una décima de segundo) producto de un fracturamiento a través de un deslizamiento pausado, o bien, producto de algún fenómeno no propio de la fuente sísmica.

En cuanto a la forma de la señal, ésta resulta complicada en función de identificar los tiempos de llegada de las fases P y S, asi como identificar el decaimiento de la señal para estimar su duración.



Registro Ocasionalmente Aceptado

Figura 4.20: Señal registrada en Geófono Tri-axial 4,5 [Hz] Fecha: 26/11/2010 Hora: 09:42:59 Site: 43 componente Norte-Sur (superior), Este-Oeste (intermedia) y Vertical (inferior). Señal altamente contaminada con baja frecuencia.

Este tipo de registro se caracteriza por tener un dominio de baja frecuencia (**Figura 4.20**) importante que oculta la señal sísmica. La baja frecuencia se puede atribuir a alguna condicion local del macizo en donde se ecuentra emplazado en Geófono que permita la oscilación de instrumento posterior al evento sísmico. En este tipo de registro resulta necesario filtrar la baja frecuencia antes de identificar las diferentes fases sísmicas.

La forma de la señal filtrada muestra una clara llegada de la fase P pero la fase S podría resultar un poco complicada. Un segundo peak posterior a la llegada de la fase S indica que el paquete de ondas que compone la señal no llega al mismo tiempo, el decaimiento de la señal resulta después de este segundo peak.
Registro Rechazado



Figura 4.21: Señal registrada en Geófono Tri-axial 4,5 [Hz] Fecha: 19/11/2010 Hora: 08:27:47 Site: 43 componente Norte-Sur (superior), Este-Oeste (intermedia) y Vertical (inferior). Tipo de registro que no corresponde a un evento sísmico.

Este tipo de registro corresponde a una señal no atribuible a un evento sísmico, más bien parece corresponder a un ruido que se asocia a la maquinaria que opera en el interior mina. El origen de este tipo de registros corresponde al trigger de los sensores, cuando un sensor recibe una señal sísmica, mediante el sistema de sincronización, todos los sensores ponen el contador temporal en cero y comienzan el registro de la señal, para este caso el sensor que recibe este tipo de señal captura "obligatoriamente" un registro de alguna oscilación circundante no importando la naturaleza de su procedencia. Claramente este registro no corresponde a la recepción de ondas P y S directas.

Tronadura



Figura 4.22: Señal registrada en Geófono Tri-axial 4,5 [Hz] Fecha: 19/11/2010 Hora: 07:52:35 Site: 43 componente Norte-Sur (superior), Este-Oeste (intermedia) y Vertical (inferior). Señal que corresponde a un polvorazo donde cada uno de los peaks observados corresponde a tiros quemados. Registro sin procesar.

La **Figura 4.22** corresponde a un registro de una Tronadura en el interior mina, cada uno de los peaks corresponden a la detonación de "tiros" cargados en perforaciones radiales en el macizo. Este tipo de registro se caracteriza por tener una corta duración (cada tiro quemado), una gran amplitud en la señal que indica una cantidad importante de energía liberada (dos ordenes mayor a un típico evento a nivel mina) y un espectro que posee una amplio rango de frecuencias producto a una emisión de alta energía en un intervalo de tiempo pequeño, además de un espaciamiento entre "tiros" constante.

Este tipo de registro es claramente observable entre dos intervalos de tiempo definidos al día; entre 07:30-08:00 de la mañana y 19:30-20:00 de la tarde. Por lo general en el procesamiento de los eventos, los sismogramas que se encuentren en el interior de estos intervalos de tiempo no son considerados.

La clasificación de los diferentes tipos de señales registradas por la red de monitoreo micro-sísmico intenta establecer una serie de patrones para el rápido procesamiento de los datos por parte del operario.

El hecho que en División Andina sólo exista una persona que realice el procesamiento de los eventos resulta importante la optimización del tiempo que se le dedique al procesamiento de cada evento, ya que de esto depende el funcionamiento en tiempo real de la red desde el punto de vista del análisis de las condiciones mecánicas en las que se encuentra el macizo sometido a actividad sísmica.

4.2.2. Clasificación Según Distribución Espacial

Sector Norte

El Sector Norte se caracteriza por tener sismogramas bien definidos lo cuales se pueden clasificar (sección anterior) como registros aceptados en Geófonos; Site 42, 43, 44 y 45 dadas las características observadas (**Figura 4.23** y **Figura 4.24**). En el Geófono del Site 41 se observa una baja frecuencia dominante.

Particularmente en los Geófonos; Site 42, 43, 44 y 45 las señales son muy claras en cuanto a la identificación de las fases sísmicas. Estos Geófonos se encuentran emplazados sobre partes del macizo que no se encuentran carcanos a la porción de macizo fragmentado por Extracción y Socavación por lo tanto, las señales registradas por estos sensores resultan ser no contaminadas por un efecto de sitio en su viaje a través de la roca desde el foco del evento hasta el sensor (ver **Figura 4.33** y **Figura 4.34**).



Figura 4.23: Espectrograma característico para registros capturados en Geófonos; Site 42, 43, 44 y 45.



Figura 4.24: Espectrograma de los registros capturados en Geófono Site 41.



Figura 4.25: Evento ocurrido Fecha: 19/11/2010 Hora: 12:26:30 en el sector Norte.

Los registros obtenidos por el Geófono del Site 41 tiene características diferentes **Figura 4.24**, éste sensor, en la totalidad de los registros, muestra una señal correspondiente a un evento sísmico contaminado con una componente de baja frecuencia importante, lo que hace pensar que existe una condición especial inducida en el macizo en el que se encuentra el sensor.

Al ordenar los sismogramas según las distancias a las que se encuentran con respecto a la fuente sísmica notamos que el Site 41 tiene un comportamiento extraño, a pesar que el Site 41 se encuentra a una distancia mayor que el Site 44 la señal resulta llegar antes en el sensor del Site 41, lo que se relaciona con una variación importante en la velocidad en el sector, o bien, depende directamente a que onda es la capturada por el sensor (directa o refractada) lo que no corresponde a materia de análisis en ésta Tesis. Para los otros sensores se cumple la relación distancia-tiempo de llegada según un modelo de velocidad constante utilizado por IMS (**Figura 4.26**).

La señal de baja frecuencia dominante que registra el sensor del Site 41 se encuentra relacionado con el Avance del Hundimiento, en la **Figura 4.25** se muestra el área Socavación en el mes de Noviembre, sin embargo la línea verde indica el avance total hasta el 30/11/2010 lo que implica que el avance del hundimiento se realizó hacia el sensor del Site 41 preferentemente en un instante anterior al mes de Noviembre del año 2010, fenómeno que dió paso a un desacoplamiento del sensor al macizo donde fue instalado provocando que éste oscile libremente mientras captura la señal de un evento.



Figura 4.26: Sismogramas de cada Geófono del evento ocurrido Fecha: 19/11/2010 Hora: 12:26:30 en el sector Norte. Velocidad estimada (excluido Site 45) usando ajuste de mínimos cuadrados para Onda P 5375,61 [m/s] y para Onda S 3154,46 [m/s].

Ubicación Sensores Sobre Nivel de Hundimiento				
Sensor	Ubicación en la Vertical [m] Respecto al nivel 3262 m.s.n.m.			
Site 41	3			
Site 42	18			
Site 43	38			
Site 44	9			
Site 45	44			
Site 46	-2			

Tabla 4.9: Ubicación de los sensores en la vertical con respecto al Nivel de Hundimiento (3262 m.s.n.m.).

Sector Centro

En el Sector Centro la distribución de los sismogramas obedece un patrón similar al observado en el Sector Norte. Los sismogramas observados en los Geófonos; Site 42, 43, 44 y 45 muestran señales claras en cuanto a forma y a composición espectral. En el Site 41 se observa una componente de baja frecuencia dominante cuyo origen corresponde al mencionado anteriormente.

Al distribuir los sismogramas según distancia del sensor que los captura al foco sísmico se observa casi nula variación según la relación distancia-tiempo de llegada para un modelo de velocidad constante de propagación de ondas sísmicas (con excepción Site 44). Bajo tal modelo se espera que los Geófonos que se encuentren más distanciados a la fuente sísmica capturen la señal sísmica en un tiempo posterior a aquellos más cercanos.

Dado que en este Sector el macizo se encuentra directamente sometido a la actividad minera, un modelo de velocidades constante para todo el macizo parece ser adecuado generalmente. Si bien, desde el punto de vista geológico y geomecánico podemos considerar que el volumen de macizo encerrado por el Sector Centro mantiene sus características en todo su interior (Apéndice A) y las distancias que deben recorrer las ondas sísmicas para alcanzar los sensores son pequeñas, la actividad minera juega un papel clave ya que tanto la Extracción como la Socavación no se aplican uniformemente en todo el macizo, por lo que existen sectores que son perturbados mayormente, produciendo que existan variaciones en las velocidades de propagación de las ondas sísmicas de manera sectorizada.



Figura 4.27: Evento ocurrido Fecha: 30/11/2010 Hora: 10:49:53 en el sector Centro.



Figura 4.28: Sismogramas de cada Geófono del evento ocurrido Fecha: 30/11/2010 Hora: 10:49:53 en el sector Centro. Velocidad estimada (excluido Site 44) usando ajuste de mínimos cuadrados para Onda P 4172,44 [m/s] y para Onda S 2756,66 [m/s].

Sector Sur

El Sector Sur muestra características muy importantes desde el punto de vista de la perturbación minera en relación a las formas de los sismogramas asi como en la propagación de las ondas sísmicas en el interior del macizo.

Las señales registradas por los sensores; Site 42, 43, 44 y 45 muestran sismogramas que poseen una componente importante de baja frecuencia pero que efectivamente corresponden a eventos sísmicos. En éste caso el evento se encuentra emplazado en un macizo que se encuentra totalmente perturbado por la actividad minera (**Figura 4.31** y **Figura 4.33**) cuyo desconfinamiento se ve reflejado en el tipo de señal que capturan los sensores la cual viaja a través de un macizo dañado haciendo que el efecto de sitio contamine la señal y atenúe ciertas componentes frecuenciales.

Mientras mayor sea la distancia que separe a la fuente sísmica del sensor mayor será el impacto del medio sobre la calidad de la señal, esto se puede observar en la **Figura 4.31** para algunos sensores ya que los sismogramas muestran formas un tanto distorcionadas que entorpecen la identificación de las fases sísmicas.

El Geófono del Site 41 captura una señal de baja frecuencia que no corresponde a un evento sísmico.

En relación al modelo de velocidades constante se observa en la **Figura 4.32** que no resulta conveniente ser utilizado en un macizo fracturado ya que éste cambia sus propiedades mecánicas considerablemente y de forma no homogénea. Las velocidades varían dependiendo en que sección del macizo viaja la señal que alcanza cada sensor.



Figura 4.29: Espectrograma característico para registros capturados en Geófonos; Site 42, 43, 44 y 45.



Figura 4.30: Espectrograma de los registros capturados en Geófono Site 41.



Figura 4.31: Evento ocurrido Fecha: 21/11/2010 Hora: 02:40:08 en el sector Sur.



Figura 4.32: Sismogramas de cada Geófono del evento ocurrido Fecha: 21/11/2010 Hora: 02:40:08 en el sector Sur. Velocidad estimada (excluido Site 41) usando ajuste de mínimos cuadrados para Onda P 4097,95 [m/s] y para Onda S 2992,55 [m/s].

Las características de la sismicidad en cada uno de los sectores considerados parece no tener características propias en cada sector, sino que se ve condicionada a la intensidad y dispersión de la actividad minera en el macizo que contiene a los sensores ya que el camino que recorre la señal sísmica induce cambios importantes en la estructura de la señal y hace difícil la correcta identificación de las fases P y S. Un funcionamiento inadecuado del sensor del Site 41 producto de su desacoplamiento con el macizo hace que éste muchas veces sea descartado para el procesamiento, localización y cálculo de parámetros sísmicos.



Figura 4.33: Columna de Extracción Acumulada como altura de columna para el mes de Noviembre, línea verde indica el Avance del Hundimiento al 30/11/2010, marcas en rojo denotan eventos considerado para cada sector y triángulos celestes corresponden a la ubicación de cada Geófono.



Figura 4.34: Vista hacia Este de la Figura 4.33. Se observa que el Geófono del Site 41 se encuentra muy cercano al frente de Hundimiento (línea verde).

Velocidades Estimadas				
Sector	Vel. Onda $P[m/s]$	Vel. Onda $S[m/s]$	Razón V_P/V_S	
Norte	5375,61	3154,46	1,7	
Centro	4172,44	2756,66	1,51	
Sur	4097,95	2992,55	1,37	

Tabla 4.10: Resumen principales velocidades estimadas para los diferentes sectores del volumen de macizo en análisis.

Las ondas sísmicas se propagan a través del medio interior en el al volumen de macizo analizado con velocidades diferentes. La razón V_P/V_S debería ser similar para las ondas de eventos en diferentes sectores siempre y cuando se considere una medio homogéneo. En la **Tabla 4.10** se muestran los valores de las relaciones de velocidad en los diferentes sectores, estos diferentes valores indican que las propiedades mecánicas del macizo varían espacialmente debido principalmente al desarrollo de la actividad minera.

4.3. Back-Analysis

Se analiza la sismicidad inducida para el período de tiempo comprendido entre el 17 al 30 de Noviembre de 2010 dentro de un volumen estimado de $(180 \times 170 \times 120 m^3)$ bajo el contacto primario-secundario Figura 4.35 entre GH-73 a GH-87 y XC-66 a XC-29) aproximadamente. Durante el período de observación se aprecian principalmente 3 grupos de sismicidad importantes analizados cada uno de ellos en forma independiente.

Los tres sectores identificados se encuentran distanciados uno de otro por el orden de 40 - 50 [m], y como indica la **Figura 4.37** con orientación en dirección E-W al igual que el sistema estructural S1 (ver Apéndice A). Cada sector se han identificado como polígono Norte (verde), polígono Centro (azul) y polígono Sur (blanco) **Figura 4.1**. El polígono norte correspodería al reconocido "espejo sísmico". Los polígonos Centro y Sur se ubican en zonas de producción a la fecha de ocurrencia de la sismicidad.



Figura 4.35: Distribución espacial de la sismicidad en relación a la superficie definida por el Contacto Primario-Secundario. Vista hacia NE (derecha) y perfil vertical vista hacia E (izquierda).



Figura 4.36: Distribución espacial de la sismicidad a lo largo del sistema de estructuras principal S1. Vista en planta (derecha) y vista siguiendo rumbo del sistema estuctural (izquierda).

Cada uno de los polígonos se caracterizan por presentar magnitudes (M_W) que varían entre -2.86 y -0.36 globalmente. En el polígono sur se concentra la mayor cantidad de eventos de magnitudes entre -1 y 0; el polígono Norte alberga una cantidad no despreciable de estos eventos. Los polígonos Norte y Centro contienen la mayor cantidad de los eventos de magnitud intermedia (-2 a -1) en el rango de magnitudes encontrado (**Tabla 4.11**).

Distribución de Magnitudes					
Polígono $-3 \le M_W < -2 -2 \le M_W < -1 -1 \le M_W < 0$					
Global	784	1794	252		
Norte	330	779	67		
Centro	454	977	84		
Sur	0	19	81		

Tabla 4.11: Número de eventos de diferentes magnitudes M_W en cada uno de los sectores analizados.

Si se ubica la sismicidad sobre un plano de estructuras geológicas, se aprecia que la sismicidad en cada uno de los sectores tienden a alojarse y alinearse sobre algunas estructuras **Figura 4.36**. Al utilizar vista en planta y en secciones orientadas hacia el Este, es posible identificar alineamientos sub-verticales (**Figura 4.37**), pero con una extensión lateral considerable. Es decir, los alineamientos propuestos son tentativos y se estimaron utilizando eventos sísmicos de magnitudes similares, en el caso de los polígonos Norte y Centro se utilizaron eventos com magnitud entre (-2 a -1), y para el polígono Sur eventos con magnitud entre (-1 a 0).



Figura 4.37: Distribución espacial sismicidad según magnitud M_W , Líneas negras indican tendencia de los eventos sísmicos en cada sector (derecha). Perfil vertical vista hacia el Este (izquierda).

La movilidad temporal de la sismicidad en cada uno de los tres polígonos determinan características particulares en relación a parámetros mineros, la **Figura 4.38** indica la movilidad temporal de la Socavación en el frente de hundimiento (línea verde), los cuadros rojos denotan los polígonos Centro (superior) y Sur (inferior). La socavación en el área que se ubica el polígono Centro se mueve hacia el Oeste a lo largo de la frente y en el área Sur, la socavación se realiza tambien hacia el Oeste en el sector superior izquierdo del área.



Figura 4.38: Distribución temporal de la Socavación desde el Figura 4.39: Movilidad temporal de la sismicidad en sec-17 al 30 de Noviembre de 2010. Cuadros en rojo indican sectores tor Norte. Imagen superior izquierda vista en planta, superior Centro y Sur desde arriba hacia abajo.

derecha perfil vertical hacia el Este e inferior izquierda sección vertical hacia el Norte.

La distribución temporal de la sismicidad en el sector Norte (polígono que se encuentra en un volumen de roca no influenciado por actividad minera) tiene movilidad N-S pasando de una estructura principal hasta otra que se encuentra más cerca de la frente de hundimiento Figura 4.39. En la vertical la sismicidad avanza hacia sectores que rodean las galerías de hundimiento agupándose dentro de los primeros 60 [m]al Norte de la frente en la zona denominada "Abutment Stress", que corresponde a un sector de aumento del estrés provocado por la formación de la cavidad.



tro. Imagen superior izquierda vista en planta, superior derecha Sur. Imagen superior izquierda vista en planta, superior derecha perfil vertical hacia el Este e inferior izquierda sección vertical perfil vertical hacia el Este e inferior izquierda sección vertical hacia el Norte.

Figura 4.40: Movilidad temporal de la sismicidad en sector Cen- Figura 4.41: Movilidad temporal de la sismicidad en sector hacia el Norte.

El sector Centro (polígono que se encuentra sobre una zona de producción) **Figura 4.40** se proyecta hacia el Oeste concentrándose en torno al frente de hundimiento, en la vertical también se observa este fenómeno, pero lo que resulta notorio es una tendencia de la sismicidad hacia una cota más inferior que en el sector Norte, en este caso la sismicidad se proyecta hacia el nivel de Transporte, lo que se relaciona con el parámetro Extracción **Figura 4.42** que se realiza desde niveles inferiores al nivel de Hundimiento. La movilidad en planta de este sector se relaciona con la distribución temporal de la socavación **Figura 4.38**.



Figura 4.42: Extracción acumulada como altura de columna en el mes de Noviembre, marcas en verde indican puntos de extracción, las marcas en negro indican la sismicidad. Sectores Centro y Sur en zonas de producción.

El sector Sur en cambio presenta un comportamiento un tanto diferente a los otros sectores, es decir, este sector se encuentra claramente activado por parámetros mineros (Socavación y Extracción) pero no muestra un claro comportamiento en cuanto a la movilidad espacio-temporal de su sismicidad.

En un principio este sector se encontraba empotrado de tal forma de conectarse solamente en una cara con la cavidad, pero durante un corto intervalo de tiempo (lo que de alguna forma explicaría la baja cantidad de eventos sísmicos en el polígono) se logró que colapsara lo que arrojó que la sismicidad se detuviera en el sector el día 22 de Noviembre.

4.3.2. Parámetros Sísmicos

Frecuencia Sísmica

El número de eventos sísmicos indica una mayor cantidad de sismicidad en los polígonos norte y centro respecto del sector sur. La cantidad de eventos por hora en todo el volumen en análisis varía en la ventana de tiempo considerada, pero muestra una tendencia oscilatoria que relaciona una condición mecánica particular del macizo en cuanto a un ciclo entre relajación y activación. En la etapa de relajación 17 al 24 de Noviembre se observa una alta ocurrencia de eventos sísmicos, mientras que entre el 25 al 30 de Noviembre disminuye el número de eventos ya que el macizo comienza a activarse haciendo necesaria una mayor cantidad de energía requerida para la ocurrencia de deformación.



Figura 4.43: Estadística descriptiva del número de eventos sísmicos en cada hora del día a lo largo de la ventana de tiempo 17-30 de Noviembre; Global (derecha) y sector Norte (izquierda). Los cuadros verdes indican en valor medio de eventos, las líneas rojas indican la mediana, los lados inferior y superior del cuadro indican el primer y cuarto quintil respectivamente, los límites inferior y superior de las líneas segmentadas indican los valores extremos y por último el signo (+) indica los valores escapados.



Figura 4.44: Estadística descriptiva del número de eventos sísmicos en cada hora del día a lo largo de la ventana de tiempo 17-30 de Noviembre; sector Centro (derecha) y sector Sur (izquierda).

La ocurrencia de eventos sísmicos a lo largo del día se relaciona con los polvorazos de hundimiento que se efectúan entre la hora 07:30 y 19:30. La **Figura 4.45** muestra un aumento significativo de la

sismicidad posterior a cada polvorazo efectuado en el día. Un polvorazo genera una perturbación dinámica que induce procesos de deformación, estos procesos generan la apertura de estructuras pre-existente o rupturas en matriz de roca que inducen procesos de re-equilibrio mediante movimientos por partes del macizo alterado lo que genera la ocurrencia de gran cantidad de eventos sísmicos.





Figura 4.45: Distribución de eventos sísmicos a lo largo del Figura 4.46: Avance del Área de Socavación Acumulada y día. Se observa un aumento en el número de eventos después Número de Eventos Acumulado en cada sector en el mes de de los polvorazos de hundimiento. El número de eventos entre Noviembre de 2010. Se observa la detención de la sismicidad polvorazos disminuye paulatinamente.

en el sector Sur el 22 de Noviembre.

La distribución temporal del número de eventos se relaciona directamente con el avance de la socavación, en la Figura 4.46 se observa la socavación acumulada como área, y el número de eventos acumulado en el total del volumen analizado y en los tres sub-sectores considerados independientes. En un primer período de tiempo entre el 20 y 23 de Noviembre se muestra un aumento en el área de socavación lo que implica un aumento en el número de eventos globalmente en el todo el volumen como en cada uno de los polígonos (polígono Sur muestra detención de sismicidad el 22 de Noviembre) que corresponden a sectores directamente perturbados por minería. En el siguiente período de tiempo entre los días 23 al 27 existe una detención de la socavación que se refleja en una detención de la sismicidad, para luego entre los días 27 y 30 de Noviembre se observa un aumento en la perturvación del macizo al aumentar la socavación y nuevamente esto genera un aumento en la sismicidad.

El polígono Norte corresponde a un caso especial ya que este sector no se encuentra sometido a actividad minera. El hecho que este sector también siga el ciclo temporal dado por la socavación implica que su sismicidad corresponde a un remanente de la formación de la cavidad.

La sección de macizo socavado corresponde a la mayor y más drástica perturbación realizada al volumen de macizo, este proceso genera la formación de caras libres que permiten el flujo de material fragmentado (producto de la fuerza gravitacional predominante) buscando el re-equilibrio del sistema.

Ley Gutenberg-Richter

De la Figura 4.47 se aprecia un fenómeno que puede ser asociado a la incompletitud del catálogo, así como también al modo de fracturamiento del macizo rocoso en el rango de magnitudes observado. En la Figura 4.48 las líneas segmentadas representan simples modelos cualitativos. Para el modelo de línea segmentada superior, se observa un déficit de eventos mayores. Para el modelo de línea segmentada inferior se observa un déficit de eventos muy pequeños. Dada las observaciones, esta última situación parece corresponder al caso en observación, delatando cierta incompletitud del catálogo, particularmente eventos muy pequeños respecto de los mayores. Para magnitudes mayores a -2,2, la caída representa en los tres sectores una pendiente (b-value) ajustable a -1.6. Este valor se ubica dentro de un rango observado en macizos rocosos sin capacidad de generar eventos mayores. El macizo escoge o está condicionado a fracturarse a través de vetas o vetillas menores, controladas por estructuras mayores.



Figura 4.47: Ley Gutenberg-Richter para cada uno de los Figura 4.48: Ley Gutenberg-Richter, se ajustan 2 rectas que sectores analizados. Se ajusta b - Value = -1.6322 implica representan una interpretación acerca del modo en que la energía $M_{Wmax} = 0,19$ usando Magnitud de Corte $M_W = -2,2$.

es liberada para eventos pequeños y eventos mayores.

Volumen Aparente

El Volumen Aparente VA es proporcional al volumen de deformación inelástica cosísmica producto de un evento sísmico. Las figuras: Figura 4.50, Figura 4.51, Figura 4.52 y Figura 4.53 muestran las variaciones del volumen aparente acumulado en cada uno de los sectores. Las variaciones del VAA con respecto al comportamiento señalado para la frecuencia de eventos, éste no es proporcional, como se podría esperar. En el primer período (entre los días 17-25) de observación, el polígono sur, a pesar de tener una baja tasa de sismicidad, involucra un tasa de cambio volumen particularmente alta y brusca. En cambio los polígonos Norte y Central muestra tasas de crecimiento menores. Esto tiene directa relación con el hecho que los eventos de mayor magnitud se concentran en el polígono sur; a pesar de contar con menos eventos, el volumen involucrado en procesos de ruptura ha sido mayor y más repentino. En el segundo período (entre los días 25-30) de observación se aprecia con claridad el detenimiento de la actividad en el polígono sur, y la baja tasa de tamaño de ruptura asociada con los otros dos polígonos lo que se traduce en incrementos menores en el volumen de deformación implicado. La diferenciación entre ambos períodos ocurre principalmentre tras la ocurrencia de eventos de magnitud mayor que destraban el sistema.



Figura 4.49: Avance del Área de Socavación Acumulada y Volumen Aparente Acumulado en cada sector.



Índice de Energía Global (línea verde).



Figura 4.52: Volumen Aparente Acumulado (línea azul) e Figura 4.53: Volumen Aparente Acumulado (línea azul) e Índice de Energía sector Centro (línea verde).

La Figura 4.49 muestra la variación temporal del área de socavación en relación a los valores acumulados de volumen aparente, la correlación entre ambos parámetros no resulta directa como lo es en el caso de la ocurrencia de eventos sísmicos, esto se debe a que un aumento en el número de eventos producido por el aumento en la socavación no implica un aumento significativo en el volumen de deformación implicado, es decir, si existe ocurrencia de un gran número de eventos estos podrían tiener asociados un volumen de deformación pequeño, en tal caso no existe relación directa.



Figura 4.50: Volumen Aparente Acumulado (línea azul) e Figura 4.51: Volumen Aparente Acumulado (línea azul) e Índice de Energía sector Norte (línea verde).



Índice de Energía sector Sur (línea verde).

Difusividad Sísmica

La difusividad sísmica (Dif) muestra una figura proporcionalmente similar a la Frecuencia de Eventos, pero marca una diferencia al indicar que en el polígono Norte la difusividad ha sido mayor en el período de observación, a pesar de tener menor tasa de frecuencia de eventos que en el polígono Central. Esta característica se tendría que asociar a un gatillamiento de la sismicidad en un espacio mayor simultáneamente. En el sector centro una mayor cantidad de eventos sísmicos se distribuye en un sector más pequeño presentando una mayor concentración que en el sector Norte donde la sismicidad parece encontrarse más dispersa, proceso vinculado con las características del material que forma parte del proceso de fracturamiento, Figura 4.54: Avance del Área de Socavación Acumulada y como el cemento que componen las vetas y fracturas.



Difusividad Acumulada en cada sector en el mes de Noviembre de 2010.

La relación que existe entre la difusividad y la socavación en el caso del sector Centro (influencia directa) corresponde a una sectorización de la sismicidad con respecto a la ubicación espacial de la perturbación dinámica producida por la actividad minera, esto combinado con una condición mecánica del macizo en cuestión. En resumen, la perturbación dinámica (socavación) activa el volúmen induciendo sismicidad, la forma en la que aumente la migración de los eventos se relaciona la dispersión espacial de los lugares donde se aplica la perturbación. Si observamos la Figura 4.38 y Figura 4.54 notamos que en el sector Centro no existe gran distancia entre los lugares donde se aplica la perturbación lo que implica un pequeño aumento paulatino en la dispersión producto del aumento en el número de eventos. Si no existe perturbación se detiene la difusividad sísmica.

Razón E_S/E_P

La Razon E_S/E_P indica que fuentes sísmicas son controladas por cizalle por sobre tracción y viceversa. Se observa (Figura 4.56) que esta razón tiende a ser mayor en el polígono Norte, indicando que en gran parte del período de observación los eventos sísmicos en éste sector están controlados por cizalle. En el sector Centro el índice muestra una variación de eventos controlados por tracción en un primer período relacionado con un proceso de desarme del macizo para luego cambiar a eventos controlados por cizalle que se relaciona con una condición de confinamiento. Para el polígono Sur el índice muestra un dominio de eventos controlados por tracción que se relaciona con un proceso de desarme del macizo debido a la actividad minera.

Radio de Brune

El radio de Brune enuncia dos cosas: Primero, establece relaciones esperadamente proporcionales a la magnitud y el volumen aparente. Segundo, entrega un número que enuncia la dimensión del radio de una falla cuyo modelo es circular y está asociada al evento sísmico. Como se puede observar en la Figura 4.55, este valor alcanza los mayores valores en el polígono Sur. Hacia el comienzo del período de observación los radios vienen de valores mayores para transitar a valores pequeños, similar a lo observado con el VA. La Frecuencia de Eventos en este mismo período presenta una tasa alta de sismicidad y la razón E_S/E_P es alta. Esta disminución en el desarrollo del tamaño de las fracturas (además de contar con la detención del proceso de sismicidad en el polígono Sur) asociada a un creciemiento de la tasa de sismicidad y de la razón E_S/E_P , se vinculan a procesos de descarga encausados por el "stockwork" o matriz que caracteriza el macizo rocoso.

Aparentemente el control por el modo en que la sismicidad se desarrolla, se relaciona con la ubicación espacial, temporal y grado de perturbación de la actividad minera.



Figura 4.55: Variación temporal Radio de Brune en cada sector. Figura 4.56: Variación temporal Razón E_S/E_P en cada sector.

Índice de Energía

El Índice de Energía es obtenido para cada polígono como se aprecia en **Figura 4.50**, **Figura 4.51**, **Figura 4.52** y **Figura 4.53**. La diferencia entre ellas refuerza la sectorización por polígonos. Los polígonos Centro y Norte poseen un orden similar entre ellos, a diferencia del Sur.

El desarrollo de la sismicidad está caracterizado por IE variables desde valores decrecientes a crecientes y luego decrecientes en cada uno de los polígonos. En el primer período el macizo entró a una fase local de desarme (valores decrecientes) y luego en el siguiente período paso a un estado de endurecimiento (valores crecientes). En este sentido, el polígono sur presenta un comportamiento diferente, parece presentar un estado de endurecimiento durante tres días para pasar al de desarme de manera bastante repentina.

La **Figura 4.57** muestra que el desarrollo de los valores altos de IE se concentran en la zonas asociadas a los polígonos norte y centro. El polígono sur presenta valores bajos que se vinculan a estados de desarme del macizo rocoso en ese sector producto a la Socavación y Extracción. En el polígono Sur es donde los tamaños asociados a los eventos sísmicos son los mayores (magnitud, VA, RB), lo que constituiría un proceso particular de desarme local. Existe una cantidad despreciable de estos eventos mayores que se emplazan también en el polígono Norte donde el proceso sísmico delata IE bajos en general haciendo que el proceso de desarme sea un poco más lento que en el polígono Centro y el volumen total de macizo en análisis.



Figura 4.57: Distribución espacial sismicidad según Índice de Energía. Vista en planta.

4.3.3. Mecanismos Focales

La selección de mecanismos focales se realizó considerando una muestra aleatoria de eventos mejor localizados (errores en la determinación de las coordenadas del epicentro bajos). Se utilizaron 16 eventos para los polígonos Norte y Centro y 10 eventos para el polígono Sur.

A cada uno de los eventos considerados se les calculó el Strike, Dip y Rake de ambos planos y se identificó el plano de falla.

Cada sector se caracteriza por tener mecanismos focales que denotan una condición local en el macizo y un tipo de fracturamiento condicionado a las perturbaciones aplicadas. La orientación del plano de falla en los eventos que se encuentran sobre sistemas estructurales que muestran una dependencia en el tipo de fracturamiento asi como en su orientación, siendo este fenómeno determinante en la ocurrencia de la sismicidad en el polígono Norte (sector que no se encuentra influenciado por actividad minera).

En la **Figura 4.58** se observan los mecanismos focales asociados a los eventos seleccionados en el sector Norte. Existe una concentración tanto de eventos cuyo mecanismo corresponde a un mecanismo inverso (controlado por cizalle Rake > 0) como también mecanismo normal (controlado por tracción Rake < 0), existe gran cantidad de eventos cuyo plano de falla es sub-vertical ($Dip > 65^\circ$) que indica que los fracturamientos se realizan en planos verticales y los deslizamientos se realizaa lo largo del Dip, según los resultados en el fracturamiento del macizo los movimientos horizontales no son permitidos. Los eventos que se encuentran sobre la matriz de roca presentan mecanismos de tipo normal que denota formación de pequeñas aperturas producto del aumento de estrés debido a la formación de la cavidad.

El control de la sismicidad requiere una componente estructural importante relacionado con una frecuencia de fracturas alta y un tipo de pegamento en las vetillas que posibiliten el almacenamiento de energía (ver Apéndice A).

Errores de Eventos Mejor Cubiertos								
Sector Norte			Sector Centro			Sector Sur		
Fecha	Hora	Err. [<i>m</i>]	Fecha	Hora	Err. [<i>m</i>]	Fecha	Hora	Err. [<i>m</i>]
19-Nov	12:26:30	3,23	21-Nov	22:18:09	1,23	21-Nov	02:40:08	3,52
21-Nov	19:08:27	1,81	30-Nov	07:41:40	2,73	18-Nov	03:07:18	1,55
22-Nov	18:58:37	3,22	30-Nov	10:49:53	2,79	18-Nov	06:31:57	1,27
22-Nov	18:02:14	3,48	26-Nov	19:23:48	2,40	18-Nov	10:50:00	1,75
30-Nov	11:26:16	2,99	23-Nov	04:26:08	2,80	18-Nov	19:35:50	1,53
30-Nov	19:18:58	3,09	23-Nov	18:30:41	2,23	18-Nov	21:54:01	1,29
19-Nov	07:53:00	2,08	18-Nov	23:02:57	2,64	19-Nov	07:41:35	1,77
18-Nov	00:44:34	2,54	19-Nov	05:47:01	2,28	19-Nov	05:11:51	1,44
21-Nov	06:15:25	1,11	19-Nov	15:56:41	1,71	17-Nov	16:45:50	0,97
21-Nov	20:32:38	3,30	21-Nov	06:08:20	0,88	17-Nov	21:07:48	1,46
21-Nov	22:18:47	3,02	22-Nov	13:18:21	2,48			
22-Nov	14:08:29	0,90	23-Nov	16:50:54	2,45			
23-Nov	00:25:15	2,05	24-Nov	20:27:34	1,76			
24-Nov	06:21:33	2,67	25-Nov	11:52:56	1,66			
25-Nov	14:32:41	2,61	26-Nov	09:42:59	1,40			
26-Nov	18:13:26	1,42	28-Nov	01:22:08	3,11			
Media		2,47			2,16			1,66

Tabla 4.12: Errores en localización de eventos para cada sector.



Figura 4.58: Selección de Mecanismos Focales en sector Norte. Líneas rojas indican sistemas estructurales. Contornos indican Extracción Acumulada como altura de columna.

		Mecanismos Focales	Sector Norte	
Fecha Hora S D R 1 S D R 2	19/11/2010 12:26:30 77 74 88 264 16 97	21/11/2010 19:08:27 53 64 -91 235 26 92	22/11/2010 18:58:37 87 82 -81 218 12 42	22/11/2010 18:02:14 200 7 176 294 89 83
Fecha	30/11/2010	30/11/2010	19/11/2010	18/11/2010
Hora	11:26:16	19:18:58	07:53:00	00:44:34
SDR1	202 12 170	66 44 95	26 17 -116	4 24 59
SDR2	302 88 78	239 46 85	233 75 98	217 70 103
Fecha	21/11/2010	21/11/2010	21/11/2010	22/11/2010
Hora	06:15:25	20:32:38	22:18:47	14:08:29
SDR1	71 16 -99	123 12 122	19 67 -112	91 80 125
SDR2	260 74 93	270 80 84	245 31 131	195 36 17
Fecha	23/11/2010	24/11/2010	25/11/2010	26/11/2010
Hora	00:25:15	06:21:33	14:32:41	18:13:26
S D R 1	81 86 -83	51 13 123	25 68 -86	81 30 82
SDR2	201 8 30	197 79 83	194 22 80	270 60 95

 Tabla 4.13: Selección de mecanismos focales sector Norte.



Figura 4.59: Estimación radios de ruptura para eventos seleccionados, se estima volumen circular de macizo involucrado.



Figura 4.60: Sismicidad Norte entre magnitudes $-3 < M_W < -2$. Se observa un claro domino estructural dado por el sistema secundario de estructuras en este rango de magnitudes que permite la movilidad de eventos entre estructuras mayores de Norte a Sur (derecha). Vista en sección siguiendo rumbo de estructuras mayores (izquierda).

Los radios de ruptura estimados como un modelo cinemático (**Figura 4.59**) en el sector muestran secciones estructurales considerables que varian entre 10 a 20 [*m*] de activación en eventos de tamaño internedio ($-2 < M_W < -1$) que se alojan sobre fallas ya sean estas pertenecientes al sistema estructural primario como secundario. Es necesario considerar que si bien los eventos no se encuentran totalmente emplazados sobre estructuras como se índica en la figura, el error asociado a la localización de los eventos (valor promedio para el sector 2,47 [*m*] **Tabla 4.12**) hace pensar en que cada evento debería encontrarse sobre un volumen esférico de radio igual el valor promedio del error alrededor del hipocentro estimado. Los radios de ruptura son considerablemente comparables a la continuidad de las fallas presentes (Apéndice A) lo que denota una importante componentes estructural en la ocurrencia de la sismicidad en el sector.



Figura 4.61: Sismicidad Norte entre magnitudes $-2 < M_W < -1$. Se observa domino estructural dado por el sistema secundario de estructuras en este rango de magnitudes al igual que un dominio de eventos controlados por pequeñas rupturas en matriz de roca. Se observa eventos alojados sobre Galerías de Hundimiento (derecha). Vísta en sección siguiendo rumbo de estructuras mayores. En este rango de magnitudes, casi la totalidad de los eventos se encuentran distribuídos entre 25 |m| sobre la Cota de Hundimiento y 10 |m| bajo la Cota (izquierda).



Figura 4.62: Sismicidad Norte entre magnitudes $-1 < M_W < 0$. Se observan algunos eventos alojados sobre estructuras mayores que contan la zona y algunos que se encuentran en los alrededores de convergencias de estructuras (derecha). Vista en sección siguiendo rumbo de estructuras mayores (izquierda).

Los eventos sísmicos de menor magnitud $-3 < M_W < 2$ (Figura 4.60) se alojan sobre un sistema estructural S2 (Apéndice A) de tres fallas que permite la ocurrencia de un gran número de eventos cuyos radios de ruptura son comparables al sistema estructural, estos eventos tienden a acercarse hacia las galerías de hundimiento no proyectándose en gran extención en la vertical. Los eventos de magnitud intermedia $-2 < M_W < 1$ (Figura 4.61) (mayor número de eventos) se proyectan sobre las paredes de las galerías. En este rango de sismicidad, existe una gran cantidad de eventos sobre matriz de roca logrando una proyección mayor en la vertical (alrededor 30-10 |m| sobre y bajo la cota de hundimiento respectivamente). Ambos rangos de sismicidad en este caso permiten la movilidad de la sismicidad en el intervalo de tiempo considerado, desde la estructura primaria que se encuentra al Norte hacia el sistema estructural primario que se encuentra más cerca al frente de hundimiento (línea verde) a través de estructuras intermedias menores del sistema secundario S2. Los radios de ruptura no superan valores más allá a 15 |m| que involucran volumenes moderados de deformación. Por otro lado, los eventos mayores $-1 < M_W < 0$ (Figura 4.62) se acercan hacia la estructura mayor superior cerca de un sistema enrejado de estructuras secundarias. En la vertical los eventos se proyectan sobre la falla mayor superior alrededor de 50 |m| sobre la cota de hundimiento.



Figura 4.63: Selección de Mecanismos Focales en sector Centro. Líneas rojas indican sistemas estructurales. Contornos indican Extracción Acumulada como altura de columna.



Figura 4.64: Selección de Mecanismos Focales en sector Centro. Líneas rojas indican sistemas estructurales. Contornos indican Área de Socavación.



Figura 4.65: Estimación radios de ruptura para eventos seleccionados, se estima volumen circular de macizo involucrado.

El el sector Centro la actividad minera genera la ocurrencia de eventos sísmicos cuya componente de tracción parece dominante en el macizo para el período de tiempo que corresponde al ciclo de desarme, para luego cambiar a un dominio de eventos con mecanismo de cizalle (confinamiento). En este sector los mecanismos focales indican eventos alineados sobre estructuras lo que implica que una cantidad de macizo escoje o se encuentra condicionado, dada la perturbación dinámica presente, a fracturarce a través de estructuras activando una cierta porción comparable a los radios de fractura asociados a los eventos, los que varían entre 5-15 [m] (Figura 4.65).

Existe una cantidad de eventos en su mayoría dominados por tracción que se encuentran sobre matriz de roca la cual se fractura generando el flujo de macizo hacia niveles inferiores (lo que implica eventos proyectados hacia niveles inferiores **Figura 4.37**). En este sentido los eventos sísmicos en el sector se encuentran directamente relacionados con la formación de la cavidad y muestran características propias de un macizo perturbado.

En éste sector los planos de ruptura (para los eventos considerados en la muestra) tienen una variabilidad mayor pero gran parte de ellos presentan planos sub-verticales con manteos superiores a 50° lo que refuerza la idea de movimientos verticales por parte del macizo dado el método de explotación empleado.

		Mecanismos Focales	Sector Centro	
Fecha	21/11/2010	30/11/2010	30/11/2010	26/11/2010
Hora	22:18:09	07:41:40	10:49:53	19:23:48
SDR1	67 24 48	115 26 -92	134 43 74	108 76 -100
S D R 2	292 72 107	297 64 91	335 49 104	324 17 125
Fecha	23/11/2010	23/11/2010	18/11/2010	19/11/2010
Hora	04:26:08	18:30:41	23:02:57	05:47:01
SDR1	12 68 -115	5 85 83	200 7 172	107 87 -85
SDR2	243 33 136	240 9 144	298 89 83	228 6 31
Fecha Hora S D R 1 S D R 2	19/11/2010 15:56:41 50 15 54 267 78 99	21/11/2010 06:08:20 92 82 -96 309 10 127	22/11/2010 13:18:21 118 71 -90 298 19 90	23/11/2010 16:50:54 47 9 75 242 81 92
Fecha Hora S D R 1 S D R 2	24/11/2010 20:27:34 154 57 -97 347 34 101	25/11/2010 11:52:56 128 13 -71 289 78 86	26/11/2010 09:42:59 60 56 74 267 37 112	28/11/2010 01:22:08 115 41 113 266 53 71

Tabla 4.14: Selección de mecanismos focales sector Centro.



Figura 4.66: Selección de Mecanismos Focales en sector Sur. Líneas rojas indican sistemas estructurales. Contornos indican Extracción Acumulada como altura de columna.



Figura 4.67: Selección de Mecanismos Focales en sector Sur. Líneas rojas indican sistemas estructurales. Contornos indican Área de Socavación.



Figura 4.68: Estimación radios de ruptura para eventos seleccionados, se estima volumen circular de macizo involucrado.

En el sector Sur la totalidad de los mecanismos focales de la muestra indican mecanismos normales cuyo esfuerzo de tracción parece dominar la ocurrencia de eventos sísmicos en la zona. Esto es claramente esperable en una zona que se encuantra en colapso posterior a una fase de confinamiento breve como se venía observamdo por medio del IE. La actividad minera es la responsable de la ocurrencia de los eventos en zonas de producción induciendo el desarme del macizo (**Figura 4.66** y **Figura 4.67**).

El fracturamiento en esta sección del macizo parece comenzar desde las estructuras presentes (se requiere menor cantidad de energía) para pasar a rupturas en la matriz de roca.

Los radios de ruptura implicados (varían entre 20-30 [m] **Figura 4.68**) generan grandes volumenes de deformación que se traducen en eventos sísmicos de grandes magnitudes $-1 < M_W < 0$ (dentro del rango de magnitudes observado). El hecho que la sismicidad se encuentre albergada alrededor de las estructuras hace que el fracturamiento se realice en extenciones mayores.

Los planos de fractura poseen una variación que indica un fracturamiento, que si bien se realiza en la vertical, existe una porción de fracturas secundarias que se realizan en planos con pendientes (manteos menores a 45°) generando caras libres mayores en el macizo. Ambos casos forman parte de una condición local de desarme del sector.

Mecanismos Focales Sector Sur					
Fecha	21/11/2010	18/11/2010	18/11/2010	18/11/2010	
Hora	02:40:08	03:07:18	06:31:57	10:50:00	
SDR1	39 83 -95	114 14 -104	113 10 -103	212 7 -24	
S D R 2	255 9 125	308 76 93	306 80 92	326 87 84	
Fecha Hora	18/11/2010 19:35:50	18/11/2010 21:54:01	19/11/2010 07:41:35	19/11/2010 05:11:51	
SDR1	104 16 -116	178 27 -89	50 86 -96	115 15 -112	
Fecha	17/11/2010	17/11/2010			
Hora	16:45:50	21:07:48			
SDR1	151 11 -75	21 62 -95			
SDR2	316 79 87	212 28 99			

Tabla 4.15: Selección de mecanismos focales sector Sur.

Capítulo 5

Instalación Sistema Sísmico Áreas 16 y 17 Nivel 16 de Hundimiento III Panel

5.1. Introducción

Un sistema de monitoreo micro-sísmico en mina constituye una herramienta de apoyo a la operación minera con el fin de controlar la actividad sísmica del macizo rocoso, evaluando su comportamiento durante el avance del hundimiento. En ese sentido, un sistema sísmico se transforma en una herramienta que permite un seguimiento y continuidad del proceso productivo de la Mina Subterránea, en otras palabras, proporciona una operación segura tanto para el personal como para la maquinaria e infraestructura comprometida en el sector instrumentado.

Un monitoreo continuo de la actividad sísmica entrega una herramienta de cuantificación e identificación de cambios en el macizo rocoso, posibles inestabilidades que vean comprometida el normal desarrollo de las operaciones mineras en el sector influenciado, de tal forma de evitar posibles daños humanos, estructurales y en maquinaria. Para lograr este cometido se debe dar énfasis al emplazamiento óptimo de los sensores que realicen el monitoreo, identificando qué sector dentro del volúmen de roca influenciado por la minería se encuentra en mayor vulnerabilidad y de que forma los sensores interactúan entre sí.

Considerando lo mencionado anteriormente se ha desarrollado e implementado un arreglo de sensores e instrumentación en general que se detalla a continuación.

5.2. Volúmen de Influencia: Área de Interés y Ubicación Espacial de los Sensores

La distribución espacial de los sensores sísmicos debe considerar varios aspectos fundamentales para el buen funcionamiento de la red de monitoreo. Se deben tener presente varios factores:

- Volúmen de macizo de interés, cobertura.
- Layout del sector a monitorear.
- Avance del hundimiento (socavación).
- Altura del contacto primario-secundario.
- Ubicación del sistema de estructuras mayores.

- Instalación del sistema de adquisición de datos (QS, SAQS y GS) y la distancia de éstas hacia el módem.
- Transmisión, lectura y almacenamiento de la información en el Host central vía Intranet.

La elección de los Sitios donde instalar los sensores en el interior mina tanto en las componentes horizontales como en la vertical, se realizan considerando lo mencionado anteriormente pero también se realiza de forma empírica donde la experiencia e instalaciones anteriores se consideran como ejemplos para tomar las decisiones finales. En ese sentido, un punto a considerar relevante en las ubicaciones finales, en particular, en la componente vertical, es considerar distribuir los geófonos a diferentes alturas, para obtener un mayor volúmen cubierto y obtener mejores resultados en la localización de los eventos sísmicos inducidos.

La disposición de 10 sensores ha quedado expuesta en Nota Interna GRMD (Villegas et al., 2011). Ocho geófonos de 4,5 [Hz] y dos de 14 [Hz]. La **Figura 5.1** replica el "layout" dispuesto, donde los puntos rojos indican la ubicación de pozos verticales con collar en el techo del nivel de hundimiento cuya longitud es indicada en color rojo al lado de cada símbolo. En cada pozo se ha dispuesto la instalación de 1 ó 2 geófonos.



Figura 5.1: Ubicación Geófonos Área 17 Nivel 16 Hundimiento.

5.3. Descripción de Componentes.

5.3.1. Sensores Geófonos 4,5 [Hz] y 14 [Hz]

Los sensores sísmicos Geófonos proporcionados por IMS (Institute of Mine Seismology) para su instalación en el Área 17 Nivel 16 Hundimiento verifican condiciones estándares por parte del fabricante, las cuales pueden ser fácilmente ratificadas previamente a su instalación. Este procedimiento de verificar las especificaciones técnicas del sensor a instalar corresponde un paso vital para asegurarse del correcto funcionamiento de la red de monitoreo, ya que una vez instalados los sensores es imposible retirarlos o cambiarlos desde dentro de la roca.



Figura 5.2: Geófono 4,5 [Hz].

Los sensores sísmicos utilizados corresponden a Geófonos Tri-axiales de 4,5 [Hz] que debe ser instalado dentro de 2° de precisión c/r a la vertical y 14 [Hz] que pueden ser instalados en cualquier ángulo. Un Geófono de esta clase se compone por tres bobinas que corresponden a las tres componentes del sensor (componente Este-Oeste o X, componente Norte-Sur o Y y componente Vertical o Z), las cuales exhiben valores diferentes de resistencia cuando el Geófono es de 4,5 [Hz] o 14 [Hz], los valores comúnmente registrados para cada tipo de Geófono y ancho de banda se resumen en la **Tabla 5.1**

Frec. Natural $[Hz]$	Resistencia $[k\Omega]$	Ancho de Banda [<i>Hz</i>]
14	3,37	3 - 2000
4,5	0,37	10 - 2000

Tabla 5.1: Resistencia típica observada en Geófonos de 4,5 [Hz] y 14 [Hz] y Ancho de Banda de operación.

Los Geófonos Tri-axiales tanto de 4,5 [Hz] y 14 [Hz] tienen como salidas 4 pares de cables que corresponden a un par por componente y un par para la electrónica interna del sensor que establece la orientación en la que se instala el Geófono, a continuación la descripción de cada par de cable en la salida del sensor:



Figura 5.3: Caja de conexión Junction Box.

Descripción cables en Geofono de 4,5 [Hz] y 14 [Hz]					
Color Par	Polaridad	Componente o Uso			
Rojo-Azul	Rojo(+) Azul(-)	Norte-Sur			
Amarillo-Verde	Amarillo(+) Verde(-)	Este-Oeste			
Blanco-Negro	Blanco(+) Negro(-)	Vertical			
Café-Violeta		Orientación			

Tabla 5.2: Descripción y uso de cables de salida Geófonos de 4,5 [Hz] y 14 [Hz].

5.3.2. Sismómetros (QS, SAQS, GS)

Los sismómetros corresponden a unidades de adquisición de datos que realizan la transformación Análoga-Digital de la señal capturada por el sensor. El conjunto conformado por un sismómetro y un sensor sísmico corresponde a un sismógrafo.

Los sismómetros elaborados por IMS son unidades son identificados según la generación de creación a la que corresponden, pero que en el fondo cumplen la misma función. El nombre genérico para los sensores IMS es el de Quake Seismometer (QS), sin embargo, hoy este nombre señala a una unidad que se reconoce físicamente distinta a las unidades sucesoras como las denominadas StandAlone QS (SAQS) y GS Seismic Station (GS).

Estos equipos cumplen características similares y ventajas sobre sus pares que apuntan a sus posibilidades respecto de protocolos de comunicación y su (inde-)dependencia respecto del computador central y la sincronización temporal a través de antena GPS.

Las características de los sismómetros IMS:

- Tasas de muestreo entre 3 [Hz] y 48000 [Hz].
- Registro continuo o trigger.
- 6 canales de conexión para sensores con 24 bits de rango dinámico: 2 tri-axiales o 6 uni-axiales u otra combinación.
- 1 conexión removible a un Hard Disk Drive (USB).
- 1 ó 2 conexiones a puertos de comunicación para telemetría o comunicación satelital (Protocolos RS232/RS485).
- 1 conexión a DC Power (10-28 [V]).
- 1 conexión a antena GPS.



Figura 5.4: Esquema conexiones QS

Descripción Conexiones QS y SAQS				
Componente	Color	Función		
Power	Rojo	+12 [V]		
	Negro	Ground		
Com.	Rojo	RS485		
	Azul	RS485		
Com. Left/Right	Rojo	RS485		
	Azul	RS485		
Sensor 1 y 2	Rojo	X+ Par 1		
	Azul	X-Par 1		
	Amarillo	Y+Par 2		
	Verde	Y-Par 2		
	Blanco	Z+ Par 3		
	Negro	Z-Par 3		

Tabla 5.3: Conexiones QS y SAQS.



Figura 5.5: Esquema de conexiones GS

5.3.3. Cables de Conexión

Sensor-Sismómetro **Figura 5.2** y **Figura 5.3**: Para cada geófono tri-axial (3-A), se requieren 4 pares de cobre $(0,5 \ [mm^2])$ (8 alambres), 3 pares usados para la componente X, Y y Z, y el cuarto par (cafévioleta) será usado para la orientación electrónica, la cual provee información acerca del geófono así como el ángulo de inclinación y conexión a la unidad QS/GS. Entre un sensor y una unidad QS o GS deben existir no más de 1200 [m] (protocolo de comunicación RS485). En caso contrario, se debe usar otra unidad QS como unidad de transferencia.

En la presente instalación en la zona referida, se tiene contemplado que 5 sismómetros recogan los cables de 10 sensores. Sin embargo, se requiere de una conexión, pues el cable original con que cuenta cada sensor tiene una longitud menor a la requerida. Esta conexión permite especificar el tipo de cable de conexión requerido al entenderla como una unidad (caja) de conexión.

Sismómetro-Unidad de Control **Figura 5.6**: Single o doble par $0.5 - 0.8 \ [mm^2]$. Para la comunicación, en términos generales cada sismómetro debe contar con 2 pares (4 cables) de común.

El módem centralizado usado (MR/485) requiere de un par single (2 alambres) para ser conectado a cada unidad QS/SAQS en cada extensión (4 extenciones para el MR/485 para conexión de sismómetros). La distancia entre nodos RS485 (QS a Módem) está limitada a 1200 [*m*] debido al protocolo de comunicación RS485 usado. Para la presente instalación 4 de los 5 sismómetros son conectados a la unidad módem MR485.



Figura 5.6: Esquema cable de comunicación (uno o dos pares de cobre) entre sismómetros IMS (QS, SAQS, GS) y unidades de control y comunicación (MR/485).

5.3.4. Unidades de Control y Comunicación (Broquera)

El controlador sísmico es conectado a los sismómetros IMS vía líneas de comunicación serial. El sistema RS485 Modem Rack provee los módems para la comunicación vía unidades de monitoreo digital IMS cuando se usa un tipo de comunicación RS485.

La unidad MR485 que posee División Andina permite 4 extensiones RS485. En el presente caso, a la unidad MR485 se conectarán 3 unidades QS y 1 unidad SAQS. Usando cables de comunicación Ethernet y ATU (cable de cincronización de tiempo), la información es tratada y procesada en la unidad Equinox que hace de Controlador Sísmico. Aquí la función es controlar las unidades de adquisición de datos (QS, SAQS, GS) y administrar el proceso de adquisición de datos. Debido a que en la presente instalación, los dos sensores de 14 [Hz] se conectarán a una unidad GS y esta debe alimentarse de un modem DSL, el procesamiento de los datos debe pasar además por las unidades I-Splitter y DSLAM.



Figura 5.7: Esquema de conexión entre componentes que forman el sistema de Monitoreo Micro-sísmico.

De la Figura 5.7 se destaca lo siguiente:

- El cable color negro entre las unidades QS y MR485, y entre el Módem DSL (GS) y la unidad DSLAM es un cable que requiere ser un par de cobre single (al menos) y es usado para comunicaciones a través de protocolo RS485.
- El cable color rojo corresponde a cables que son usados para sincronizar los tiempos de registro.
- El cable color azul corresponde a cables standard Ethernet.
- La unidad Equinox genera la señal de tiempo ATU. Esta señal requiere ir la unidad DSLAM (GS) y
 también a la unidad MR485 (QS) como un rol sincronizador. Para dividir esta señal en dos idénticas,
 se toma la señal de tiempo desde Equinox y se inserta en el I-Splitter. Así la unidad I-Splitter divide
 esta señal única en dos idénticas señales y las envía al MR485 y DSLAM. La distancia entre las
 unidades Equinox y DSLAM no debe ser superior a 2 [m].

5.3.5. Plan Instalación Geófonos y Cajas Sísmicas

La Figura 5.8 se observa la información necesaria para visualizar la relación entre las cajas QS o GS y los respectivos geófonos 3-A. Se muestran los 7 pozos proyectados. Cada pozo se identifica la altura a la que se instala ya sea uno o dos sensores (sitio 1 al sitio 10) y con las unidades QS o GS existentes (triángulos color azul y lila). Se muestra la ubicación de la caja de interconexión.



Figura 5.8: Se muestra la ubicación de 7 pozos (puntos en color rojo) dispuestos para la instalación de 10 geófonos tri-axiales (3-A) en las calles GH-77, GH-83, GH-87, Socavones Este y Oeste, y las cajas sísmicas (triángulos color azul y lila) dispuestas a lo largo del XC-29. En la circunferencia color verde se ubica la caja de interconexión que recoge todo el cableado proveniente de las cajas sísmicas y prosigue por el Socavón Este hasta llegar a la Broquera. La Tabla 5.5 muestra información detallada de la ubicación de cada geofono y su conexión a cada caja sísmica.

Distancia QSs a Caja de Interconexión			
Id QS	Largo cable 1 par [m]		
QS1	48		
QS2 (GS)	74		
QS3	141		
QS4	197		
QS5 (SAQS)	248		

 Tabla 5.4: Distancia de cables de conexión entre caja sísmica y caja de interconexión.

Ubicación de sensores en pozos verticales								
Sitio	Ubicación	Coordenada Collar [<i>m</i>]		Longitud	Ubicación	Caja		
		Este	Norte	Cota	Pozo [m]	Pozo [m]	Sísmica	
1	Soc. Este	23107,523	27798,602	3263,646	10	10	OS1 (OS)	
2	GH-77	23026.591	27761.877	3264.945	35	15		
3	011 / /	20020,071	27701,077	0201,210	35	30	OS2(GS)	
4	GH-79	22988 866	27778 006	3265 922	40	35	Q 52 (05)	
5		22,000,000	27770,000	5265,522	40	15	OS3(OS)	
6	GH-83	22963 582	27713 944	3265 743	40	35	200 (QD)	
7	011 05	22703,302	27713,744 520	22,00,002 27,10,011	5265,715	40	25	OS4(OS)
8	GH-87	22908,844	27706,278	3266,090	15	15		
9	Soc. Oeste	22880,536	27725,030	3266,900	15	15	OS5(SAOS)	
10	Soc. Oeste	22875,540	27657,257	3266,028	15	15		

Tabla 5.5: Ubicación sensores Geófonos en sondajes verticales Área 17 Nivel 16 Hdmto.

5.4. Instalación Geófonos y Lechado de Pozos

Instalación Sensores

Step 1: Se comienza instalando en la perforación vertical el *despiche de la lechada* (ver Figura 5.10) que corresponde a un tubo de PVC de resistencia cuyo diámetro es de 20 [*mm*] que abarca todo el largo de la perforación. Este tubo cumple la función de ser el indicador que la perforación está totalmente lechada ya que cuando esto ocurra la lechada comenzará a salir desde el extremo del tubo que se deja fuera del sondaje. En el comienzo del tubo se realizan cortes en 45° (ver Figura 5.9) para así evitar obstrucciones de aire al bajar la lechada por su interior.



Figura 5.9: Cortes en el principio del despiche.



Figura 5.10: Ingreso del despiche de la lechada.

Step 2: Antes de ingresar el geófono en el sondaje se deben extender los soportes metálicos del instrumento (ver Figura 5.11) hasta lograr el diámetro del sondaje a fin de asegurar el sensor a las paredes del pozo cuando se llegue a la altura final establecida previamente, el diseño de los soportes hace que dentro de pozo el sensor sólo pueda desplazarse verticalmente hacia arriba (ver Figura 5.2).



Figura 5.11: Soporte especial para el sensor en la primera vara metálica del kit de instalación. El sensor se encuentra con sus soportes extendidos para acoplarse a las paredes del sondaje.

Antes de comenzar a deslizar el sensor a través del sondaje es necesario alinearlo con el Norte geográfico, esto se realiza haciendo coincidir una marca (N) que posee cada geófono en su cubierta con una marca que se realiza previamente en la galería **Figura 5.16**. Para levantar el sensor hasta lograr su posición final en el pozo se utilizan varas metálicas que forman parte del kit de instalación del geófono, que también exhiben marca Norte (ver **Figura 5.12**). El geófono se acopla en la primera vara que posee un diseño especial (ver **Figura 5.11**) y luego se van añadiendo varas a medida que son deslizadas dentro del pozo, las varas se unen con un perno a medida que van siendo añadidas (ver **Figura 5.13**), para así al momento de retirarlas no se desprenda alguna y quede en el sondaje, finalmente una pieza especial se une al final de las varas que corresponde a una vara en forma de "T" (ver **Figura 5.14**) con una indicación que apunta hacia el norte, para de esta forma, girar el sensor hasta alinearlo con el norte geográfico. Una vez el sensor logra fijarse en la altura requerida con los soportes antes mencionados se desacopla de las varas y estas son retiradas.



Figura 5.12: Varas metálicas para levantar sensor hasta su posición final.



Figura 5.13: Unión de varas metálicas asegurada con perno para no perder una sección durante su extracción desde el sondaje una vez que el sensor se encuentre en su posición final.

• Step 3: Luego de retirar las varas metálicas se sella el extremo del cable que baja del geófono con cinta aislante para protegerlos. Finalmente se ingresan dos tubos negros uno corto y otro largo dentro del sondaje y se tapa con cemento alrededor de un metro al final del pozo.

Los dos tubos que se ingresan al final del pozo cumplen las siguientes funciones: el tubo corto se usa para el sellado pequeño del pozo y el tubo más largo se usa para ingresar la lechada que acoplará completamente al sensor y al macizo, esto se realiza después de dos días instalado el sensor.



Figura 5.14: Alineamiento final del sensor con el norte geográfico.



Figura 5.15: Taco de cemento para sellar el sondaje.

Al final del proceso los geófonos instalados y listos para ser grauteados lucen según la Figura 5.16.

Lechado de Pozos

Realizados los pasos anteriores se comienza el grauteo (acoplamiento) de los sensores a la matriz de roca, permitiendo al sensor registrar por completo los movimientos del macizo producto de eventos sísmicos ocurridos en el volúmen de roca cubierto por la distribución espacial de los sensores. El acoplamiento de los sensores se realiza ingresando cemento al sondaje en su totalidad.



Figura 5.16: Instalación Geófonos Sitio 4 y 5 (14 y 4,5 [Hz] respectivamente) GH-79 Área 17 Nivel 16 Hundimiento.

La siguiente imagen **Figura 5.17** muestra los diferentes componentes de la máquina que permite bombear la lechada hacia el interior del sondaje, en la figura podemos destacar como componente principal la denominada **bomba** que inyecta la lechada en el sondaje permitiendo que ascienda a lo largo de todo el pozo, es importante destacar que la potencia de la bomba debe ser tal que permita lechar pozos de longitud mayor o igual a 40 [m] que corresponde al pozo de mayor longitud.



Figura 5.17: Componentes principales de la lechadora.

Para ingresar la lechada al sondaje se conecta el tubo desde la bomba inyectora de la lechadora (ver **Figura 5.17** y **Figura 5.18**) a uno de los tubos que se dejaron fuera del sondaje en la primera parte de la instalación, el lechado se realiza desde abajo hacia arriba, por esta razón se conecta el ingreso de la lechada al tubo más corto en primer lugar y luego se cambia al segundo más largo de tal forma de evitar forzar demasiado la inyección de la lechada haciendo que el proceso de llenado del pozo sea más eficiente. Posteriormente, una vez llenado el pozo, indicado por el despiche que corresponde al tubo que abarca todo el largo del sondaje, se bloquea el despiche y se procede a retirar el tubo que inyecta la lechada terminando con el proceso.



Figura 5.18: Conexión lechadora a tubo de ingreso de lechada al sondaje.



Figura 5.19: Despiche indicando llenado de pozo.



Figura 5.20: Vista sondaje completamente grauteado.

El siguiente esquema muestra el resultado de la instalación de los sensores y grauteo del pozo en un corte vertical paralelo al sondaje Figura 5.21:



Figura 5.21: Esquema interno de instalación en sondaje (instalación de dos sensores a diferentes alturas). Resulta indispensable la correcta identificación de los componentes que se extienden fuera del pozo durante la instalación.

5.5. Instalación Cajas Sísmicas en Nivel 16 Hundimiento

La instalación de las cajas sísmicas se realiza a partir del esquema especificado por la Figura 5.8 en el XC-29.



Figura 5.22: Esquema de conexiones para caja sísmica QS (anfloga para SAQS) se indican las conexiones de cada sensor 3-A con especificación de las componentes por colores **Tabla 5.2**). Para la QS no se conecta el par de cables para la orientación del sensor.



Figura 5.23: Esquema conexión caja GS (derecha). Conexiones componentes del sensor 3-A se indica necesario la conexión de la orientación del sensor (izquierda).

Una vez conectados los componentes en cada caja sísmica según la configuración que se indica en las figuras Figura 5.22 y Figura 5.23 estas son instaladas a lo largo del cruzado 29 (XC-29). Las figuras siguientes muestran la condición final de cada caja sísmica (1 QS, 1 SAQS y GS a modo de ejemplo).





Figura 5.24: Caja sísmica QS (derecha). Caja sísmica SAQS (izquierda).



Figura 5.25: Caja sísmica GS.

Es relevante tener en cuenta que mirando de frente a cada caja sísmica (hacia el Sur) - los cables que corresponden a cada sensor instalado en los pozos verticales llegan desde la izquierda y la derecha de forma tal que el cable de la izquierda ingresa en las cajas QS al conector "SEISMIC 1" (ROJO) y el cable de la derecha al conector "SEISMIC 2" (AZUL). En el caso de la caja GS, el conector "SEISMIC 1" se identifica con el color AMARILLO y el conector "SEISMIC 2" con el color VERDE. Esta disposición es de vital importancia, ya que la definición de un conector "SEISMIC 1" o "SEISMIC 2" relaciona e identifica, en el proceso de configuración del sistema, la ubicación de cada sensor instalado con la lectura que de éste se hará al momento de procesar las series de tiempo o sismogramas capturados por el mismo sistema. La identificación de cada sensor es asignada por los números 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109 y 110 (respectivamente sensores desde s1 a s10).

5.6. Conexiones Cajas Sísmicas-Broquera

La Figura 5.7 muestra el esquema definitivo de la conexión entre los componentes del sistema de monitoreo.

La conexión desde una unidad QS, SAQS o GS a las unidades de control y comunicaciones (Broquera) deben existir no más de 1200 m. Esta conexión se hace a través de un cable single par con protocolo de comunicación RS485. Esta conexión se hace a través del XC-29 con cables de comunicación que se juntan en la denominada caja de interconexión (ubicada a la entrada del XC-29 desde el Socavón Este). Este punto de interconexión, de igual forma que las denominadas "junction boxes", permiten un adecuado control del sistema de conexiones. Desde este punto, las comunicaciones prosiguen por el Socavón Este a través de un único cable (color azul cable troncal) hasta el último eslabón de la cadena de conexiones ubicada en la Broquera. Desde este punto, la información es transmitida vía internet hasta el "computador central del sísmico" instalado en oficina de Geomecánica en el Barrio Cívico.

Los cables Sensor-Caja Sísmica son de 4 pares (X, Y, Z, Electrónica de cada sensor 3-A) y luego los cables Caja Sïsmica-Troncal-Broquera corresponden a cables de comunicación de 1 par. El cable toncal que recepciona 5 pares de cables (3 QSs 1 SAQS y 1 GS cada uno con 1 par de comunicación) tiene 6 pares para conectar, de esta forma, de presentarse un fallo en alguno de los pares se puede reparar sólo interconectando y no recableando el sector.



Figura 5.26: Esquema de conexiones en Broquera.

La Figura 5.26 especifica el modus operandis entre las unidades que reciben las comunicaciones desde cada Caja Sísmica y las distribuye a través de las distintas unidades mostradas para proseguir a un puerto LAN. En este sentido, vale mencionar que si no existiese la unidad GS, todos los cables llegarían al módem MR232/485 (unidad que modifica el protocolo de comunicación desde un modo RS232 a RS485 y que posee físicamente 4 extensiones RS485 Módem Rack) para luego proseguir a la unidad Equinox (lee protocolo de comunicación RS232, controla las unidades de adquisición de datos (QS, SAQS, GS) y transforma la señal RS232 a RJ45 además de administrar el proceso de adquisición de datos), y desde aquí salir al puerto LAN. Esta simpleza se ve modificada al integrar en el sistema de sismómetros QS una unidad GS+DSL Modem (la que recibe los 2 únicos sensores de 14 Hz y posee un

protocolo de comunicación DSL), debido a que esta última está configurada para transmitir directamente a una nueva unidad denominada DSLAM, y desde aquí proseguir al puerto LAN. Debido a la necesidad de combinar las llegadas desde las unidades QS y GS, se requiere sincronizar los tiempos (señal de tiempo ATU), y para ello, se incluye la unidad I-Splitter (Splitter). Así entonces la señal recogida por el Módem MR232/485 que viaja a la unidad Equinox, antes de salir al puerto LAN, pasa por el Splitter, donde los tiempos son sincronizados con la información que viene desde la caja sísmica GS y es recibida por la unidad DSLAM. Por este motivo, la señal que proviene de las cajas QS termina finalmente pasando por la misma DSLAM, para desde aquí salir al puerto LAN.

En términos formales, uno de los puertos en la unidad Equinox genera la señal de tiempo ATU. Esta señal requiere ir a la unidad DSLAM y también a la unidad MR485. Para dividir esta señal de tiempo en dos señales idénticas, se toma la señal de tiempo desde Equinox y se inserta en el I-Splitter. Así la unidad I-Splitter divide esta señal única en dos idénticas señales y las envía al MR485 y DSLAM. Al conectar la unidad Equinox al DSLAM, quedan ambas unidades conectadas a la red a través de sus puertos y cables Ethernet (RJ45).

5.7. Conexiones en Broquera

Las unidades instaladas en la Broquera han sido ubidadas dentro de una caja metálica (RACK) que permitirá cierto aislamiento de los equipos al polvo en suspención.

Las figuras; **Figura 5.27**, **Figura 5.28** y **Figura 5.29** se presenta el estado en el que quedó la instalación. Como se puede apreciar, una parte anterior y posterior pueden ser identificadas.

Un detalle de las conexiones entre las unidades ubicadas en el Rack se presenta en la **Figura 5.30**. Aquí se muestra con exactitud los puertos que son utilizados y conectados entre sí.



Figura 5.27: En la Broquera, rack con unidades MR232/485, Equinox, DSLAM, I-Splitter, Puertos LAN y Fuente de Poder.



Figura 5.28: Vista anterior del Rack.



Figura 5.29: Vista posterior del Rack..

Parte Posterior Rack (BROQUERA)



Figura 5.30: Esquema muestra estado de conexiones final en la Broquera.

Capítulo 6

Discusión

6.1. Métodos de Picado de Eventos Sísmicos

Los diferentes parámetros sísmicos analizados poseen una relación directa con el número y selección de eventos utilizados para su determinación con respecto a un número total de eventos que sigue un patrón realista del fenómeno al cuál se atribuyen tales parámetros. Algunos parámetros exhiben un comportamiento que se relaciona en mayor medida al número de eventos utilizados.

Tanto el Índice de Energía IE y la Ley Gutenberg-Richter G - R muestran un comportamiento mayoritariamente independiente al número de eventos establecidos por el método de picado, lo que indica que tales parámetros hacen alusión a una condición específica en la que se encuentra el macizo en función de la energía requerida para la ocurrencia de eventos asi como la variabilidad de la deformación inelástica.

En relación a las distribución espacial según magnitudes para ambos casos existe una pequeña diferencia o deficit de eventos con magnitud pequeña particularmente en el sector Centro donde se alojan la mayoría de estos eventos. Se debe tener presente que esta diferencia puede entregar una idea erronéa de la condición mecánica del macizo rocoso. La selección aleatoria de los eventos en cada hora de catálogo es responsable de este fenómeno, en ese sentido, es necesario establecer un criterio más estricto de selección de eventos para el método.

El Radio de Brune no exhibe variaciones marcadas en tendencia en cada sub-intervalo temporal. Se puede notar que mayormente este índice no se modifica con el uso del método de picado, lo que indica que el tipo de fracturamiento asi como las longitudes que éste alcance dependen de las condiciones estructurales del macizo y de los niveles de estrés a los que se someta.

Los parámetros que se ven mayormente afectados al utilizar el método de picado son: Volumen Aparente Acumulado VAA, Difusividad Sísmica, Frecuencia Sísmica y Razón E_S/E_P .

El Volumen Aparente Acumulado sufre grandes cambios al utilizar el método de picado, se pierde información acerca de cambios locales importantes en el macizo que se traducen en aumentos repentinos del índice en un determinado intervalo de tiempo lo que es bastante importante para efectos de un estudio de sismicidad inducida. El *VAA* es sensible al número de eventos considerados ya que a cada uno de ellos se le asocia un volumen de deformación inelástica.

Con respecto a la Difusividad Sísmica, este índice varía tanto en magnitud como en tendencia local. La Difusividad Sísmica se encuentra íntimamente relacionada con el espaciamiento temporal entre eventos consecutivos así como a su distancia, lo que se ve modificado completamente al usar un método de picado que selecciona de forma aleatoria cada evento en cada hora de catálogo.

Otro parámetro que sufre modificaciones es La Razón E_S/E_P en relación a variaciones en proporción mayormente. La magnitud de éste parámetro es importante al momento de determinar un cambio en la geometría de la fuente sísmica.

Aplicar un método de procesamiento de registros sísmicos sujeto a un número máximo de eventos a procesar implica perder información importante por parte de parámetros que describen condiciones locales de un macizo sometido a actividad minera. Es necesario considerar un método de procesamiento donde el número de eventos a considerar sea siempre proporcional al número de eventos registrados en cada hora de catálogo.

6.2. Clasificación de Eventos Sísmicos

La forma de los registros sísmicos capturados por un sensor que conforma una red de monitoreo a nivel mina está condicionada a las características mecánicas del macizo en el entorno al sensor, las cuales varían durante la evolución temporal y espacial de la actividad minera. Las características de la señal sísmica depende de la ubicación en la cual se encuentra desarrollandose la actividad minera ya que la fregmentación inducida en el macizo genera cierta dispersión a medida que la señal se propaga en la roca hasta alcanzar el sensor. La cuantificación de tal dispersión no se consideró como objetivo en esta Tesis.

El conocimiento del estado del macizo alrededor de cada uno de los sensores permite acelerar en cierta forma el "picado" de los eventos sísmicos, paso que resulta bastante importante para un funcionamiento pleno de una red de monitoreo sísmico.

Existe una dependencia entre velocidad de propagación de las ondas P y S en el volumen de macizo analizado con el grado de desconfinamiento que sufre en diferentes sectores debido a la actividad minera. La actividad minera induce fragmentación en el macizo, el grado de fragmentación en los diferentes sectores genera variaciones en las velocidades con las que se propagan las ondas. Las variaciones en cuanto a la diferenciación geológica-estructural del volumen de macizo pueden considerarse similares no siendo responsable, en gran medida, de las variaciones mecánicas observadas.

6.3. Back-Analysis

Los eventos sísmicos registrados en lugares donde el macizo se encuentra sometido a actividad minera (Extracción, Socavación) se encuentran controlados por esfuerzos de tracción por sobre esfuerzos de cizalle relacionándose con condiciones de desarme del macizo. En los sectores alrededor de la actividad minera se encuantra una cantidad considerable de eventos controlados por cizalle indicando un control estructural de la sismicidad producida por la formación de la cavidad en la zona del "Abutment Stress".

Los diferentes ciclos que sufre un macizo sometido a la actividad minera generan variaciones en la geometría de la fuente sísmica en relación al control de la energía liberada.

El sistema de estructuras presente en el volumen de macizo involucrado en el análisis juega un rol controlador de posibles fuentes sísmicas. Se determina un alineamiento entre la actividad sísmica y sistema de estructuras mayores para el período de observación. El sistema de estructuras secundario permite la movilidad de la sismicidad entre estructuras mayores.

La evolución temporal y espacial de parámetros mineros como lo son Socavación y Extracción controlan el número de eventos sísmicos registrados en el volumen de macizo analizado. La ausencia de forzantes en el desarme del macizo reduce paulatinamente el número de eventos sísmicos, lo cual establece una fuerte relación entre actividad minera y ocurrencia de sismicidad.

6.4. Instalación Sistema Sísmico

Un sistema de monitoreo micro-sísmico corresponde a una herramienta de control que permite el seguimiento de las condiciones del macizo rocoso y su evolución al ser sometido a perturbaciones por parte de la actividad minera. El correcto funcionamiento de ésta herramienta de control depende de su instalación adecuada y de la posterior manupulación y mantenimiento por parte de personal calificado.

La planificación de la instalación del sistema de monitoreo requiere un estudio exhaustivo en cuanto a las características geologicas-estructurales del volumen de macizo que se desea monitorear, asi como de los requerimientos instrumentales y diseño del entorno en donde se desea emplazar el sistema. La planificación del desarrollo de la mineria juega un rol principal dentro de la instalación ya que esta variable estima la duración de los sensores que conforman la red.

El proceso de instalación de la red de monitoreo requiere un seguimiento minusioso en cuanto a la verificación del correcto funcionamiento de sus componentes. La instalación adecuada de los sensores (Geófonos) que se acoplan en el interior de la roca resulta crucial para lograr un correcto monitoreo de los eventos sísmicos registrados por la red.

El orden en la conexiones de los componentes de la red, particularmente, la identificación del cableado, requiere un cuidado especial, ya que para redes de monitoreo formadas por una cantidad considerable de sensores (10 para esta ocación) la instrumentación a interconectar es mayor haciendo que la probabilidad de una conexión erronéa entre componentes aumente considerablemente y por ende un mal funcionamiento de la red.

Capítulo 7

Conclusiones y Recomendaciones

7.1. Conclusiones

- 1. Aplicar un método de procesamiento de registros sísmicos sujeto a un número máximo de eventos a procesar implica perder información importante por parte de parámetros que describen condiciones locales de un macizo sometido a actividad minera.
- La forma de los registros sísmicos capturados por un sensor que conforma una red de monitoreo a nivel mina está condicionada a las características mecánicas del macizo en el entorno al sensor, las cuales varían durante la evolución temporal y espacial de la actividad minera.
- 3. La velocidad de propagación de las Ondas P y S varían principalmente según el grado de fragmentación en diferentes sectores del macizo donde es perturbado, asi como también en la intensidad de la perturbación.
- 4. Los eventos sísmicos registrados en lugares donde el macizo se encuentra sometido a actividad minera se encuentran controlados por esfuerzos de tracción por sobre esfuerzos de cizalle relacionándose con condiciones de desarme del macizo.
- Los diferentes ciclos que sufre un macizo sometido a la actividad minera generan variaciones en la geometría de la fuente sísmica.
- 6. El sistema de estructuras presente en el volumen de macizo involucrado en el análisis juega un rol controlador de posibles fuentes sísmicas. Se determina un alineamiento entre la actividad sísmica y sistema de estructuras mayores para el período de observación 17 al 30 de Noviembre del 2010.
- 7. La evolución temporal de parámetros mineros como lo son Socavación y Extracción controlan el número de eventos sísmicos registrados en el volumen de macizo analizado.
- 8. La instalación de una red de monitoreo sísmico en un entorno minero requiere de un conocimiento completo de las características del macizo a monitorear, el sector donde se realiza la instalación y la planificación del avance de la actividad minera. El mantenimiento y correcta manipulación de la red es fundamental para su funcionamiento continuo que permita obtener un seguimiento completo del macizo.

7.2. Recomendaciones

El presente trabajo establece una serie de criterios a considerar para el análisis de información sísmica a futuro proveniente de la red de monitoreo de División Andina, en este sentido, este trabajo corresponde a un primer paso en el desarrollo del continuo funcionamiento de la red y el análisis de la información. El análisis de la información procesada durante un intervalo de tiempo establecido se puede presentar en forma resumida a modo de una "cartilla" como herramienta de apoyo para el personal dedicado al área de geomecánica de la División, y en general, como material de consulta para el área productiva.

El correcto funcionamiento de la red de monitoreo y continuidad resulta ser fundamental para la interpretación del catálogo de eventos sísmicos, ya que es necesario un intervalo de tiempo considerable para caracterizar de manera óptima los ciclos que sufre el macizo durante la faena minera, es decir, la ventana de tiempo a analizar requiere estar acotada por información sísmica.

Se hace necesario para la División contar con personal que desarrolle de manera continua el procesamiento de la información sísmica. Dependiendo del número diario de registros sísmicos se hace necesario el desarrollo de una metodología de selección de eventos a analizar para tener un procesamiento en "tiempo real" de los eventos y hacer un seguimiento de la evolución del macizo sin caer en un "estancamiento" de la información.

En cuanto al análisis de de la información, se hace necesaria la incorporación del Tensor de Momento Sísmico y el modelamiento de sismogramas sintéticos con el fin de obtener una representación física de la fuente que genera el evento sísmico. Establecer un modelo de velocidades para el yacimiento en función de la información geológica-estructural y minera con la que se cuenta, aydaría a determinar de mejor manera la ubicación de los eventos en el macizo.

Para la planificación de la ubicación espacial del arreglo de sensores se hace necesario contar con una estimación de los errores en la determinación de hipocentro del evento para cada configuración establecida, además de contar con una proyección de la sensibilidad (en relación a la magnitud M_W) de cada configuración, de tal manera de identificar que sectores en el interior del macizo se encontrarán mejor cubiertos dependiendo de la configuración seleccionada. Ambas herramientas resultan útiles para identificar la ubicación adecuada de los sensores en función de la ocurrencia de sismicidad esperable en sectores donde el macizo se ve modificado.

Durante la instalación de la red de monitoreo, en particular, la instalación de los sensores (Geófonos), es necesario contar con la instrumentación adecuada para lograr el correcto acoplamiento del sensor al macizo, ya que de otra forma el funcionamiento de la red puede verse comprometido.

A la fecha la División posee una red de monitoreo formada por diez sensores tri-axiales con los cuales se caracteriza la sismicidad en el interior de la mina subterránea, poniendo a prueba los criterios establecidos en éste trabajo, al igual que integrando las recomendaciones según sean desarrolladas las herramientas para hacerlo.

Apéndice A

Caracterización Geológica-Geomecánica Áreas 14, 15, 16 y 17 Nivel 16 Hundimiento y 16 1/2 Producción III Panel

A.1. Caracterización Áreas 14 y 15

A.1.1. Litología

Las áreas 14 y 15 cubren un área aproximada de 41360 $[m^2]$, 21000 $[m^2]$ en el área 14 y 20000 $[m^2]$ en el área 15. Como se aprecia en la **Figura A.1**, en el Nivel 16 Hundimiento, se encuentra desarrollada en su mayor porción en roca de tipo *Granodiorita Río Blanco (GDRB)*, con su extremo Oeste dominado por el *Complejo de Brechas Río Blanco (CBRB)*, con zonas puntuales de *Pórfido Cuarzomonzonítico (PQM)*.

En el Nivel 16 Producción las unidades litológicas se repiten, con una mayor proporción de *PQM* en el extremo Noreste, ver **Figura A.2**.



Figura A.1: Litología interpretada del Nv 16 Hundimiento, sector áreas 14 y 15. En color sólido, mapeos de labores. En achurado, interpretación a partir del modelo de secciones 2008.

El área 15, tiene características similares, con su mayor parte desarrollada en *GDRB* y con tramos menores de *CBRB*, *Brecha de Turmalina (BXT)* y *Andesita (AN)*, en su extremo Noreste para el Nivel 16 Hundimiento y una mayor proporción de *CBRB* y *PQM* en el Nivel 16 Producción.



Figura A.2: Litología interpretada del Nv 16 Producción, sector áres 14 y 15. En color sólido, mapeos de labores. En achurado, interpretación a partir del modelo de secciones 2008.

En la vertical, se aprecia un claro dominio de la roca de caja *GDRB* diques puntuales de *PQM* y presencia de brechas del tipo *CBRB* en el sector central y Oeste y *BXT* en el extremo Este, hasta el contacto con la *Chimenea Riolítica (CHRIOL)* (Figura A.3).



Figura A.3: Litología secciones XC-65, XC-55 y XC-45. En línea verde, base del Nivel 16 Hundimiento y proyección vertical Áreas 14 y 15.

A.1.2. Caracterización Estructural

El sector comprendido por las Áreas 14 y 15 LHD muestra una predominancia de estructuras de orientación EW y subverticales (ver **Tabla A.1**), con espesores típicos cercanos a los $0,05 \ [m]$ y rellenos moderados a blandos. Existen 6 fallas mayores identificadas, de acuerdo a su continuidad, espesor y relleno (**Figura A.4**), las que no necesariamente siguen la tendencia EW (ver **Tabla A.1**).

De estas 6 fallas mayores identificadas para el sector, 5 corresponden a fallas a escala Mina, con expresión en superficie (Figura A.4).



Tabla A.1: Sistemas Estructurales Áreas 14 y 15.



Figura A.4: Fallas mayores interpretadas para las áreas 14 y 15 Nivel 16 Hundimiento.

Las fallas más importantes, desde el punto de vista, geotécnico son la Falla 1 (Pamela), Falla 2 (Rosario) y Falla 5 (Sandra). La primera, (falla Pamela) es importante, pues su espesor típico es de aproximadamente 0,3 [m] y un máximo de 0,5 [m], con rellenos blandos a moderados (**Tabla A.2**), cruza tanto roca secundaria como primaria y tiene expresión en superficie. Su continuidad horizontal es de 370 [m] identificados. La Falla 2 (Rosario) por su parte, presenta un relleno blando de salbanda, en el sector del GH-63 tiene una potencia de 1 [m], también ha sido correlacionada con una falla mayor en superficie y en el Nivel 16 Hundimiento, tiene una continuidad reconocida de 175 [m]. Por último, la Falla 5 (Sandra), a pesar de tener espesores menores, tiene continuidad de 380 [m] (cruza todo el Nivel de Hundimiento) y ha sido correlacionada con una falla en superficie de más de 2000 [m] de longitud, también ha sido identificada en el Nivel 16 Producción.

Otras estructuras importantes en el sector Norte LHD son las Fallas 2 (Cinthya) y 3 (Susana) (Ver **Figura A.5**). Fallas cuya continuidad, tipo de relleno, espesor y expresión en superficie, las hacen rele-

Falla N° Nombre	Rumbo / Manteo Representativo	Espesor Típico Máximo [<i>m</i>]	Continuidad Reconocida [<i>m</i>]	Relleno
FALLA 1 (PAMELA)	N50°E/50°-60°SE	0,2-0,3/0,5	360	Cataclasita- Arcilla-Yeso
FALLA 2 (ROSARIO)	N65°W/70°SW	$0,\!4-0,\!5/1$	175	Salbanda-Yeso- Roca
FALLA 3 (CINTHYA)	N70°W/85°SW	0,1-0,2/0,5	210	Salbanda-Yeso- Roca-Sulfuros
FALLA 4 (SUSANA)	EW/SUBVERTICAL	0,1-0,15/0,15	200	Salbanda-Yeso- Roca-Sulfuros
FALLA 5 (SANDRA)	EW/85°N	$0,\!05-0,\!1/0,\!15$	380	Salbanda-Yeso- Sulfuros
FALLA 6 (S/N)	N80°W/75°N	0,1-0,15/0,2	180	Salbanda-Yeso- Roca

Tabla A.2: Caracterización general de las estructuras mayores Áreas 14 y 15.

vantes. La Falla 2 ha sido identificada hasta el GH-71, y la Falla 3 hasta el GH-73.

Estas 2 últimas fallas, no escapan a la tendencia EW del sector, no obstante, se aprecia como el rumbo de cada estructura es ligeramente NW a medida que se avanza hacia el norte, aparentemente controladas por la presencia de la *CHRIOL* en el extremo Noreste del Tercer Panel.



Figura A.5: Fallas mayores en sector comprendidos por las áreas 14 y 15.

A.1.3. Contacto Primario Secundario

La zona de roca secundaria más destacable en el Nivel 16 Hundimiento se encuentra entre los GH-65 al GH-71, al norte del XC-66 y hasta el XC-47. Dicho sector es complejo desde el punto de vista litológico, con varios tipos de roca, tanto primaria como secundaria. La litología dominante es la *GDRB* en los GH-69 y GH-71 y la *CBRB*, *BXT* y *AN*, en los GH-65 y 67.

La calidad geotécnica de la roca en el sector es en general regular, con zonas de mala calidad, asociadas

a la *BXT* y *AN* (principalmente en el GH-67), rocas que presentan un alto fracturamiento, que llega a las 15 - 22 f/m (fallas por metro) y puntualmente a mas de 23 f/m, asociadas tanto al tipo de roca secundaria como a la conjugación estructural de fallas del sector. En general, las zonas con *AN* y *BXT* tienen un RMR (Rock Mass Rating) de 35 - 40 (bajo), las zonas de *GDRB* tienen un RMR de 45 - 50 (regular) y el XC-47 (borde del contacto primario-secundario) un RMR de 40 - 45 (regular).

Además de lo anterior, el sector se encuentra afectado por la presencia de agua canalizada por las abundantes fallas del sector, las que disminuyen considerablemente la calidad geotécnica de la roca, en particular en el extremo norte de la zona del contacto a lo largo del XC-47 (donde hay abundante escurrimiento de agua) y en el extremo norte del GH-67, donde hay goteos en roca fuertemente fracturada (*AN* y *BXT*).

Por su parte, las nuevas zonas de roca secundaria en el Nivel 16 Producción afectan a áreas más puntuales, directamente bajo el sector de roca secundaria que apareció en el Nivel 16 Hundimiento, específicamente entre los BP-59 a BP-63 y entre los CP-69 a CP-71. Estas zonas de roca secundaria son producto de canalización de fluidos por las abundantes fallas en el sector, lo que aumenta notoriamente la permeabilidad de la roca, permitiendo la infiltración de agua que transforma la roca primaria en secundaria, abriendo sus diaclasas y oxidando sus vetas.

La altura de la columna de roca primaria se mantiene baja hasta el GH-71, por lo que la presencia puntual de agua en los desarrollos hacia el norte entre los GH-65 y 71 no se descarta, sobretodo en sectores de fallas, ya que estas forman un buen conducto para la canalización de fluidos.



Figura A.6: Modelo 3D de alturas de columna de roca primaria en Nivel 16 Hundimiento. Se aprecia como la altura de columna baja abruptamente hacia el XC-47 y sube hacia el oeste, a la altura del GH-73.

El modelo de contacto integrado para la mina subterránea, muestra como la altura de columna de roca primaria en el sector Norte LHD aumenta violentamente, desde la zona de roca secundaria entre los GH-65 al GH-71 al norte del XC-66 hasta alcanzar alturas máximas de roca primaria de 135 [m], 182 [m] y 192 [m] para las secciones 65, 55, y 45.



Figura A.7: Altura de roca primaria máxima y minima desde el Nivel 16 LHD a la altura de las secciones XC-65, XC-55 y XC-45.

A.1.4. Frecuencia de Fracturas

Los tramos más complejos, dentro de las áreas aparecen asociados a las áreas de roca secundaria que se detectaron en el Nivel de Hundimiento, específicamente en los tramos con alto fracturamiento de BXT y AN observados en el GH-67 (Figura A.8).

Una vez pasada la zona de contacto primario-secundario, la roca aumenta su fracturamiento a valores de 8 - 14 f/m en el extremo Este y central del Panel, hasta 15 - 22 en el extremo Oeste con zonas puntuales de más de 23 f/m en el extremo Oeste de las secciones 65 y 55.



Figura A.8: Fracturamiento en áreas 14-15 y nueva zona de roca secundaria mapeada en Nivel 16 Hundimiento.



Figura A.9: Secciones XC-65, XC-55 y XC-45 frecuencia de fracturas. En línea verde, base del Nivel 16 Hundimiento y proyección vertical Áreas 14 y 15.

A.1.5. RMR (Laubscher 1996)

Salvo por los tramos de roca secundaria, todas las rocas en las Áreas 14 y 15 a la altura del Nivel 16 Hundimiento, tienen un comportamiento geotécnico bueno, con valores de RMR superiores a 60.

Los sectores específicos con roca de menor calidad, relacionadas a la presencia nuevas zonas de roca secundaria con alto fracturamiento, se encuentran al norte del XC-66 (hasta el XC-47) y entre los GH-65 al GH-71 en el extremo noreste del nivel de Hundimiento y entre los BP-59 a BP-63 y las CP-69 a CP-71 en el nivel de Producción (**Figura A.10** y **Figura A.11**). En el nivel de Hundimiento, los valores

de RMR son de 35-40, para la *AN* y *BXT*, 45-50 para la *GDRB* de mayor fracturamiento en el XC-47 y 45-50 para la *GDRB*. Para en nivel de Producción el RMR en el sector de roca secundaria es de 55-60.

En la vertical se aprecia como los valores de RMR son moderados, asociados a un fracturamiento variable entre 8 a más de 23 f/m en la roca sobre el contacto primario secundario. Los valores más altos de RMR los tiene la *CHRIOL* en el extremo Este del Panel y los mas bajos están en el extremo Oeste, relacionados con las zonas de mayor fracturamiento en roca secundaria entre las secciones 45 a 65 (**Figura A.12**).



Figura A.10: RMR en sector áreas 14 y 15 y áreas de roca secundaria en Nivel 16 Hundimiento.



Figura A.11: RMR en sector áreas 14 y 15 y áreas de roca secundaria en Nivel 16 Producción.



Figura A.12: Secciones XC-45, XC-55 y XC-65 RMR. En línea verde, base del Nivel 16 Hundimiento y proyección vertical Áreas 14 y 15.

A.2. Caracterización Áreas 16 y 17

El sector definido por las áreas 16 y 17 LHD comprenden 35298 $[m^2]$ desglosados en 15858 $[m^2]$ del Área 16 y 19440 $[m^2]$ del Área 17. Las áreas comprenden desde la Sección XC-55 por el sur, a la Sección XC-25 hacia el norte.

A.2.1. Litología

Ambas áreas muestran una clara predominancia de roca de tipo *GDRB*, la que es cortada por cuerpos acotados de brecha del *CBRB* y en forma puntual por diques de *PQM*.

En las secciones comprometidas en la Áreas 16 y 17, se aprecia como hay una clara predominancia de la roca de caja que se marca en mayor medida hacia el extremo Norte. La sección XC-55 muestra la presencia de brechas de *CBRB*, aunque estas se encuentran en su mayor porción por sobre el nivel 16 y no en su base. Las alturas mínimas de columna de roca antes de llegar a la *CHRIOL* son de 350 [m] en el extremo Este del Panel, con máximos de alrededor de 550 [m] de altura en el extremo Oeste.

A.2.2. Caracterización Estructural

Ambas áreas muestran una fuerte predominancia de diaclasas de orientación NS, con un segundo sistema NW de gran dispersión, ambos subverticales (Ver **Tabla A.3**). Las fallas, en cambio muestran una orientación preferencial EW, con un sistema secundario NS repetitivo pero de baja continuidad (Ver **Tabla A.4**). Un tercer sistema de mayor dispersión aparece con estructuras mas continuas entre las fallas mayores.



Figura A.13: Litología de las Áreas 16 y 17.



Tabla A.3: Sistemas Estructurales Áreas 16 y 17.

Al considerar solo las fallas, es notorio un patrón estructural definido por estructuras de orientación EW a ENE que contienen un enrejado de estructuras secundarias con direcciones NW en el Área 16 y NS en el Área 17.

En cuanto a estructuras mayores, es evidente la relevancia de las estructuras EW por sobre las fallas NW y NS, ya que estas son las de mayor continuidad y potencia.

Es relevante señalar la diferencia que existe en cuanto a estructuras mayores entre las Áreas 16 y 17, siendo la primera mucho más densa en su patrón estructural, principalmente en el lado Este, asociado


Tabla A.4: Sistemas Estructurales Áreas 16 y 17.

a un sector de roca secundaria entre los GH-65 y GH-71 al sur del XC-47. Este sector también presenta abundantes estructuras de gran continuidad y potencia importante, con rellenos blandos a moderados.

La tendencia de las estructuras mayores cambia radicalmente hacia el Norte del XC-47, con escasas fallas relevantes y un patrón mucho menos denso con estructuras predominantes de orientación NW y NS de baja potencia y continuidad.



Figura A.14: Interpretación estructural en Áreas 16 y 17, Nivel 16 Hundimiento.



Figura A.15: Litología y estructuras Nivel 16 Hundimiento.



Figura A.16: Fallas mayores en Áreas 16 y 17.

Falla N°	Espesor [m]	Continuidad [m]	Relleno
FALLA 1	0.05-0.2	210	Salbanda-Yeso-Roca
FALLA 2	0.05-0.4	310	Salbanda-Yeso-Roca-Cataclasita
FALLA 3 y 3A	0.05-0.3	300 y 120	Salbanda-Yeso-Roca-Cataclasita
FALLA 3B	0.03-0.05	140	Salbanda
FALLA 4	0.1-0.6	300	Cataclasita
FALLA 5	0.05-0.15	250	Salbanda-Yeso-Roca

Tabla A.5: Caracterización general de las estructuras mayores Áreas 16 y 17.

A.2.3. Contacto Primario-Secundario

El contacto Primario-Secundario define el límite entre dos zonas de calidades geotécnicas contrastantes, asociadas a los efectos de la infiltración de aguas superficiales (roca secundaria) y la roca sin efectos de meteorización (roca primaria).

El modelo muestra como la roca en toda la superficie desarrollada de las Áreas 16 y 17 es de tipo primaria, sin embargo, la topografía del contacto tiene cambios abruptos en las alturas y pendientes y por ende diferencias importantes en las alturas de columna de roca primaria-secundaria (Figura A.17).



Figura A.17: Vista en perspectiva del contacto P-S, se aprecia como las alturas de columnas de roca primaria cambian notoriamente de Norte a Sur y de Este a Oeste.

A.2.4. Caracterización Geotécnica

La calidad del macizo está directamente relacionada al tipo geotécnico de roca en el sector y a la frecuencia de fracturas medidas. Al encontrarse ambas áreas completamente desarrolladas en roca de tipo primaria, la calidad observada es alta, con valores de RMR de entre 60 – 70 en todo el sector asociados a frecuencias de fracturas de 0 – 7 vet-yeso/m (Figura A.18).



Figura A.18: RMR en Áreas 16 y 17 (derecha). Frecuencia de fracturas en Áreas 16 y 17 (izquierda).

Bibliografía

- Aki K., Richards P., (1980, 2002). "Quantitative Seismology" Second edition. University Science Books. ISBN 0-936702-96-2.
- [2] Alarcón A., (2008). "Sistema de Identificación Sísmica para el Volcán Popocatépetl" Universidad Nacional Autónoma de Mexico.
- [3] Belmonte A., Dunlop R., (2004). "Criterios de Alerta Sísmico" El Teniente. Informe SI Geomecánica, Mina El Teniente.
- [4] Belmonte A., (2005). "Sismología Aplicada a Minería Subterránea" DERK Ingeniería y Geología Ltda.
- [5] Belmonte A., (2005). "Curso de Sismología y sus Aplicaciones en la Actividad Minera" DERK Ingeniería y Geología Ltda.
- [6] Belmonte A., Scherpenisse C., (2009). "Monitoreo Microsísmico del Fracturamiento Hidráulico Div. Andina" Informe Geoblast S.A.
- [7] Brzovic A., Benado D., (2003). "Sistema de Clasificación Geotécnico Roca Primaria Mina El Teniente" Informe Final, SGL-I-050/2003, Div. El Teniente-CODELCO.
- [8] Buforn E., (1994). "Métodos para la determinación del mecanismo focal de los terremotos" Universidad Complutense, Madrid Núm. 6. 113-139.
- [9] Cronje F., (2004). "Preferred cabling used on the ISS" Manual ISS.
- [10] Dunlop R., Gaete S., (1994). "Bases para un Criterio de Alerta" Informe Area Geomecánica, Dpto. Estudios y Métodos Operacionales Div. El Teniente CODELCO.
- [11] Dunlop R., (2001). "FUNDAMENTOS PARA LA CONDUCCIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA A UN MÉTODO DE CAVING" CODELCO-CHILE División El Teniente.
- [12] Dunlop R., (2007). "MANUAL DE OPERACIÓN DEL SISTEMA SÍSMICO MINA Y SISTEMAS ANEXOS (V. 1)" Div. El Teniente CODELCO CHILE.
- [13] Hanks T., Kanamori H., (1979). "A Moment Magnitude Scale" JGR, 10, vol. 84 No. B5, 1979.
- [14] Herráiz M., (1997). "Conceptos Básicos de Sismología para Ingenieros" Universidad Nacional de Ingeniería-CISMID, Lima Perú.
- [15] Ibáñez J., Carmona E. "Sismicidad Volcánica" Universidad de Granada, Granada.

- [16] Kanamori H., (1977). "The Energy Release in Great Earthquakes" Journal of Geophysical Research, Vol. 82, No. 20.
- [17] Kock, Errol de (2004). "Basics of Communications" Manual ISS.
- [18] Larsson K., (2004). "Seismicity in Mines A Review" Lulea University of Technology. ISSN: 1402-1536.
- [19] Legrand D., (2005). "Series de tiempo Tratamiento de señales" Universidad de Chile.
- [20] Mendecki A., (1993). "Real Time Quantitative Seismology in Mines" ISS International, Welkom, SouthAfrica.
- [21] Mendecki A., (1997). "Principles of Monitoring Seismic Rockmass Response to Mining" ISS International, Welkom, SouthAfrica.
- [22] Mendecki A., (1997). "Seismic Monitoring in Mines" Chapman & Hall Great Britain at the University Press, Cambridge. ISBN0 412 75300 6.
- [23] Mendecki A., Van Aswegen G., Mountfort P., (1999). "A GUIDE TO ROUTINE SEISMIC MONI-TORING IN MINES" A J Jager y J A Ryder (eds), Creda Comminications, Cape Town.
- [24] Ortiz F., (2009). "*Caracterización Geotécnica Estructural Áreas 14 y 15 LHD*" Superintendencia de Geomecánica, Div. Andina-Codelco.
- [25] Ortiz F., (2010). "Caracterización Geotécnica Estructural Áreas 16 y 17 LHD" Superintendencia de Geomecánica, Div. Andina-Codelco.
- [26] Peña J. "Espectrogramas Basados en Funciones Wavelets" Museo Nacional de Ciencias Naturales CSIC, Madrid.
- [27] Quiñones L., Soto C., Ortiz F., (2010). "Caracterización Geotécnica y Evaluación Geomecánica Secuencia de Hundimiento Área 14-15 LHD Mina Río Blanco" Superintendencia de Geomecánica, Div. Andina-Codelco.
- [28] Richards P., (1990). "Theoretical Seismology" Elsevier Science Publishers B.V.
- [29] Riga A., Lyon-Caen H., Armijo R., Deschamps A., Hatzfeld D., Makropoulos K., Papadimitriou P., Kassaras I., (1996). "A microseismic study in the western part of the Gulf of Corinth (Greece): implications for large-scale normal faulting mechanisms" Geophys. J. Int. 126,663-688.
- [30] Slawinski M., (2003). "Seismic Waves and Rays in Elastic Media" Vol. 34 Elsevier Science.
- [31] Stein S., Wysession M., (2003). "An Introduction to Seismology, Earthquakes and Earth Structure" Blackwell Publishing Ltd.
- [32] Urbancic T., Young R., Bird S., Badwen W., (1991). "Microseismic source parameters and their use in characterizing rock mass behavior: considerations from Strtathcona Mine".
- [33] Van Aswegen G., (1991). "The evaluation of fault and dike stability in Mines Concepts and cases from Welkom" ISS International, Welkom, SouthAfrica.
- [34] Villegas D., (2011). "Plan de Instalación y Monitoreo Sísmico, Areas 16 y 17 LHD, Nivel 16 Hundimiento III Panel" Superintendencia de Geomecánica, Div. Andina-Codelco.