

TABLA DE CONTENIDO

Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivo General.....	3
1.2.2 Objetivos Específicos	3
1.3 Alcances.....	4
1.4 Metodología	4
CAPITULO 2 Antecedentes	6
2.1 Minería Subterránea.....	6
2.1.1 Panel Caving	7
2.2 Mina El Teniente, Sector Reservas Norte (RENO).....	10
2.2.1 Litología	11
2.2.2 Estructuras principales en RENO	14
2.3 Generalidades de la sismicidad	15
2.3.1 Sísmicidad inducida en Minería	16
2.3.2 Energía radiada por el evento sísmico	17
2.3.3 Magnitud del evento sísmico	18
2.3.4 Momento sísmico.....	19
2.3.5 Momento Magnitud.....	20
CAPITULO 3 Modelos.....	21
3.1 Índice Ambiental.....	21
3.2 Regresión Logística.....	23
3.2.1 Desempeño del modelo y curva ROC	24
CAPITULO 4 Generación de Base de Datos y Estadísticas	26

4.1	Geología.....	27
4.1.1	Unidades Litológicas.....	28
4.1.2	Unidades Geotécnicas.....	29
4.1.3	Fallas y Estructuras	31
4.2	Condición de Esfuerzos	33
4.3	Variables Mineras.....	34
4.3.1	Frentes Mineros.....	35
4.3.2	Definición de áreas	38
4.3.3	Ancho de frentes.....	47
4.3.4	Velocidad de Extracción y ángulo de extracción.....	49
4.3.5	Esfuerzo Vertical en la Zona de Abutment	54
4.3.6	Fracturamiento hidráulico (FH)	58
4.4	Análisis de la sismicidad inducida	58
4.4.1	Zona Sísmica.....	59
4.4.2	Zona de Abutment	65
4.5	Resumen Base de datos generada para modelo de Regresión	66
4.6	Parámetros Índice Ambiental	67
4.6.1	Geología	68
4.6.2	Condición de Esfuerzos.....	70
4.6.3	Geotecnia	71
CAPITULO 5 Herramientas computacionales desarrolladas		74
5.1	Extraer información del archivo DXF en Python.....	75
5.2	Procesamiento de la información inicial	75
5.2.1	Trazado de Frentes Mineros.....	76
5.2.2	Procesamiento de unidades litológicas y geotécnicas.....	78

5.2.3	Procesamiento de Fallas estructurales.....	78
5.2.4	Procesamiento de Topografía.....	79
5.2.5	Procesamiento Catalogo de extracción	79
5.3	Obtención de Variables Mineras	80
5.3.1	Calculo de áreas.....	80
5.3.2	Discretización unidades litológicas y Geotécnicas.....	82
5.3.3	Discretización de fallas estructurales.....	84
5.3.4	Obtención de velocidad de extracción, altura extraída, tonelaje extraído y Ángulo de extracción.	85
5.3.5	Profundidad y condición de esfuerzos	86
5.4	Extracción de Eventos Sísmicos	87
5.5	Calculo de parámetros del Índice Ambiental	88
CAPITULO 6 Resultados y Análisis		90
6.1	Historiales de variables geo-mineras	90
6.1.1	Área Socavada	91
6.1.2	Área Incorporada	93
6.1.3	Área en Quiebre	95
6.1.4	Área de Losa	96
6.1.5	Velocidad de extracción.....	98
6.1.6	Ángulo de Extracción promedio	102
6.1.7	Esfuerzo vertical en la zona de abutment.....	104
6.1.8	Observaciones.....	106
6.2	Modelo de Regresión Logística	106
6.2.1	Escenario Base.....	109
6.2.2	Escenario con nuevos casos	114

6.3	Índice Ambiental.....	119
6.3.1	Análisis de la distribución de Momento Magnitud.....	119
6.3.2	Resultados Modelo, caso Base	120
6.3.3	Resultado Modelo, ajuste Local.....	124
CAPITULO 7 Conclusiones y Recomendaciones		128
7.1	Generación y obtención de Base de datos.....	128
7.1.1	Automatización del proceso de generación y filtrado de datos.....	128
7.1.2	Base de datos obtenida	129
7.2	Análisis eventos sísmicos	129
7.3	Elaboración y calibración de modelos.....	130
7.3.1	Modelo de Regresión Logística	130
7.3.2	Índice Ambiental	131
7.4	Conclusiones del trabajo	131
CAPITULO 8 Bibliografía		133

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Daño en infraestructura (galería de sección de 6.0x6.0 m) debido a sismicidad inducida (estallido de roca).....	2
Figura 2	Panel Caving Convencional	8
Figura 3	Panel Caving con Hundimiento Previo	8
Figura 4	Panel Caving con Hundimiento Avanzado	8
Figura 5	Comportamiento de los Esfuerzos, Abutment Stress (basado en Karzulovic, 2005 [14])	9
Figura 6	Mina El Teniente, Cornejo [12]......	11
Figura 7	Mapa litológico y layout del nivel de producción de mina el RENO. Sectorización Fw (patilla) y Hw (cabeza).	12

Figura 8. Emplazamiento de estructuras principales en RENO.....	14
Figura 9 Esquema conceptual de generación de actividad sísmica en minería de Caving [22].	16
Figura 10 Metodología utilizada para generar el Índice ambiental	21
Figura 11 Esquema general de la definición del índice ambiental.....	22
Figura 12 Curva ROC (Fawcett,2005).....	25
Figura 13 Litologías Mina El Teniente, AutoCAD. (Plano Geológico Integrado, Nivel de Hundimiento 2121, GL9-10649)	28
Figura 14 Litologías Mina El Teniente, Generadas en Python	29
Figura 15 Plano de Zonas geotécnicas definidas a partir del desarme potencial de macizo rocoso [30]	30
Figura 16 Fallas Geológicas, Mina El Teniente, AutoCAD	32
Figura 17 Discretización de Fallas Geológicas, Python	32
Figura 18 Topografía Mina El Teniente, AutoCAD	33
Figura 19 Topografía sector RENO, obtenido en Python	33
Figura 20 Modelo de Esfuerzos In-situ utilizando los promedios de sectores indicados por AKL [32]	34
Figura 21 Definición de zonas de Análisis, Frentes mineros Diciembre 2010, Sector RENO.....	35
Figura 22 Frentes de Socavación 2000-2010, Sector RENO, El Teniente.....	36
Figura 23 Frentes de Extracción 2000-2010, Sector RENO, El Teniente.....	37
Figura 24 Frentes de Régimen 2000-2010, Sector RENO, El Teniente.	38
Figura 25 Área Socavada periodo i.....	39
Figura 26 Gráfico Área Socavada por Zona y periodo	39
Figura 27 Gráfico Área Socavada Acumulada por zona.	40
Figura 28 Área Incorporada periodo i.....	41
Figura 29 Gráfico Área Incorporada por Periodo y Zona.....	42
Figura 30 Gráfico Área Incorporada Acumulada por zona.	42
Figura 31 Área en Quiebre periodo i	43
Figura 32 Gráfico Evolución temporal Área en Quiebre por Zona.....	44
Figura 33 Área de Losa periodo i	45

Figura 34 Gráfico Evolución temporal Área de Losa por Zona.....	46
Figura 35 Ancho de Frente de extracción y socavación	47
Figura 36 Gráfico Evolución temporal Ancho de Frente de Extracción por zona. .	48
Figura 37 Gráfico Evolución temporal Ancho de Frente de Socavación por zona.	48
Figura 38 Estimación del ángulo de extracción para cada periodo i y zona j	50
Figura 39 Gráfico Tonelaje Extraído en Área en Quiebre por periodo y zona.	52
Figura 40 Velocidad de Extracción en Área en Quiebre por zona y periodo.	52
Figura 41 Gráfico velocidad de extracción versus altura extraída, Puntos de extracción en Quiebre.	53
Figura 42 Gráfico Ángulo de Extracción promedio	54
Figura 43 Profundidad Representativa para cada zona y periodo.....	57
Figura 44 Esfuerzo Vertical Zona de Abutment stress	57
Figura 45 Polígono de búsqueda, Zona Sísmica.....	60
Figura 46 Gráfico Evolución temporal sumatoria de momento sísmico. Zona Sísmica 1	60
Figura 47 Gráfico Evolución temporal sumatoria de momento sísmico. Zona Sísmica 2	61
Figura 48 Gráfico Evolución temporal sumatoria de momento sísmico. Zona Sísmica 3	61
Figura 49 Gráfico Evolución temporal sumatoria de momento sísmico. Zona Sísmica 4	62
Figura 50 Gráfico Evolución temporal sumatoria de momento sísmico. Zona Sísmica 5	62
Figura 51 Gráfico Evolución temporal sumatoria de momento sísmico. Sector RENO	63
Figura 52 Histograma Momento Magnitud máximo por caso, Zona Sísmica.	65
Figura 53 Histograma Momento Magnitud máximo por caso, Zona Abutment.	66
Figura 54 Zona de estudio Índice Ambiental. 800x800 metros.....	68
Figura 55 Mapa Contactos Litológicos, Índice Ambiental	69
Figura 56 Mapa Fallas Geológicas, Índice Ambiental	70

Figura 57 a) Mapa Esfuerzo Principal Mayor (s_1), b) Mapa razón anisotropía (s_1/s_3).	71
Figura 58 Histograma U_i	72
Figura 59 Mapa U_i	72
Figura 60 Resultado Triangulación de Delaunay, Python.	81
Figura 61 Generación de Contornos de unidades litológicas, AutoCAD	82
Figura 62 Contornos unidades Litológicas en formato requerido, AutoCAD	82
Figura 63 Discretización unidades litológicas cada 1 metro.....	83
Figura 64 Topografía, Formato original, a) vista en Planta, b) vista isométrica.....	86
Figura 65 Celda de la triangulación de la Topografía.....	87
Figura 66 Gráficos Área socavada acumulada por zona con Eventos sísmicos, a) Zona 1, b) Zona 2, c) Zona 3, d) Zona 4, e) Zona 5, f) todas las zonas, g) Distribución Casos con eventos Sísmicos relevantes.	92
Figura 67 Gráficos Área incorporada acumulada por zona con Eventos sísmicos, a) Zona 1, b) Zona 2, c) Zona 3, d) Zona 4, e) Zona 5, f) todas las zonas, g) Distribución Casos con eventos Sísmicos relevantes.	94
Figura 68 Gráficos Área en Quiebre por zona con Eventos sísmicos, a) Zona 1, b) Zona 2, c) Zona 3, d) Zona 4, e) Zona 5, f) todas las zonas, g) Distribución Casos con eventos Sísmicos relevantes.	96
Figura 69 Gráficos Área de Losa por zona con Eventos sísmicos, a) Zona 1, b) Zona 2, c) Zona 3, d) Zona 4, e) Zona 5, f) todas las zonas, g) Distribución Casos con eventos Sísmicos relevantes.	97
Figura 70 Gráficos Velocidad de Extracción en área en quiebre por zona con Eventos sísmicos, a) Zona 1, b) Zona 2, c) Zona 3, d) Zona 4, e) Zona 5, f) todas las zonas, g) Distribución Casos con eventos Sísmicos relevantes.....	99
Figura 71 Gráficos Velocidad de extracción máxima por zona con Eventos sísmicos, a) Zona 1, b) Zona 2, c) Zona 3, d) Zona 4, e) Zona 5, f) todas las zonas, g) Distribución Casos con eventos Sísmicos relevantes.	100
Figura 72 Gráficos Tonelaje extraído en área en quiebre por zona con Eventos sísmicos, a) Zona 1, b) Zona 2, c) Zona 3, d) Zona 4, e) Zona 5, f) todas las zonas, g) Tonelaje Extraído acumulado en área en quiebre.....	102

Figura 73 Gráficos Ángulo de Extracción promedio en área en quiebre por zona con Eventos sísmicos, a) Zona 1, b) Zona 2, c) Zona 3, d) Zona 4, e) Zona 5, f) todas las zonas, g) Distribución Casos con eventos Sísmicos relevantes.....	103
Figura 74 Gráficos Esfuerzo vertical en la zona de Abutment por zona con Eventos sísmicos, a) Zona 1, b) Zona 2, c) Zona 3, d) Zona 4, e) Zona 5, f) todas las zonas, g) Distribución Casos con eventos Sísmicos relevantes	105
Figura 75 Gráfico Indicadores de calidad de los Modelos de Regresión.....	113
Figura 76 Grafico métricas de los Modelos de Regresión Logística, Nuevo Escenario.	117
Figura 77 Distribución de Momento magnitud, Casos cota $2100 \pm 25, 50, 75, 100$	120
Figura 78 Mapa Índice Ambiental.....	121
Figura 79 Mapas a) Condición de Esfuerzos, b) Geotecnia, c) Geología, Índice Ambiental Base	121
Figura 80 Histograma Índice Ambiental, caso base	122
Figura 81 Curvas Gutenberg-Richter, Índice Ambiental Base	122
Figura 82 a) Mapa Sumatoria de Momento caso ± 100 , b) Frente de Socavación Diciembre 2010.	123
Figura 83 Sistema de Falla N1, G, F y C.....	124
Figura 84 Mapa Parámetro presencia de Fallas Principales	124
Figura 85 Mapa Índice ambiental local.....	125
Figura 86 Mapas a) Condición de Esfuerzos, b) Geotecnia, c) Geología, Índice Ambiental Local.....	126
Figura 87 Histograma Índice ambiental local.....	126
Figura 88 Curvas Gutenberg-Richter casos $\pm 25, 50, 75$ y 100 m. Índice ambiental	127

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Principales unidades litológicas de sector RENO, El Teniente [17].....	13
Tabla 2. Estructuras principales y sus características.	14

Tabla 3 Relación Cualitativa entre la magnitud de un evento sísmico y como se sintió en la mina (Hudyma et al.,2003)	19
Tabla 4 Matriz de contingencia.....	24
Tabla 5 Zonas Geotécnicas [30].....	31
Tabla 6 Estadística Descriptiva Área Socavada por periodo.....	41
Tabla 7 Estadística Descriptiva Área Incorporada.....	43
Tabla 8 Estadística Descriptiva Área en Quiebre	45
Tabla 9 Estadística Descriptiva Área de Losa	46
Tabla 10 Estadísticas Ancho Frentes de socavación y extracción	49
Tabla 11 Estadísticas Velocidades de extracción y Tonelaje extraído en polígono en Quiebre.	50
Tabla 12 Estadísticas Ángulo de Extracción por zona	53
Tabla 13 Estadísticas condición de esfuerzos por Zona	56
Tabla 14 Formato EVP, Eventos Sísmicos.....	59
Tabla 15 Eventos Sísmicos con Momento Magnitud > 1.0 para cada Zona Sísmica	63
Tabla 16 Variables Geo-Mineras Obtenidas.....	67
Tabla 17 Distribución Litológica, Celdas Índice Ambiental	69
Tabla 18 Detalle contactos litológicos.	69
Tabla 19 Estadísticas Fallas Geológicas, Índice Ambiental	70
Tabla 20 Condición de Esfuerzos, Índice Ambiental.	71
Tabla 21 Estadística U_i	72
Tabla 23 Variables tentativas a Utilizar en Modelo de Regresión	107
Tabla 24 Correlación de Variables.	109
Tabla 25 Resultados Regresión Logística, Escenario Base, Modelos 1, 2 y 3....	110
Tabla 26 Resultados Regresión Logística, Escenario Base, Modelos 4, 5 y 6....	111
Tabla 27 Resultados Regresión Logística, Escenario Base, Modelos 7	112
Tabla 28 Matriz de Confusión, modelo 6, Escenario Base.....	114
Tabla 29 Resultados Regresión Logística, Nuevo Escenario, Modelos 1, 2 y 3..	115
Tabla 30 Resultados Regresión Logística, Nuevo Escenario, Modelos 4 y 5.....	116
Tabla 31 Matriz de Confusión, Modelo 4, Nuevo Escenario.....	118

Tabla 32 Parámetros y Ponderadores Índice Ambiental [37]	120
Tabla 33 Parámetros Índice Ambiental, Ajuste Local	125

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Energía Radiada, Boatwright y Fletcher 1984	17
Ecuación 2 Momento Sísmico, Aki y Richards 1980	19
Ecuación 3 Expresión derivada para estimar el Momento Sísmico, Hanks y Wyss 1972	20
Ecuación 4 Momento Magnitud.	20
Ecuación 5 Métricas Desempeño	24
Ecuación 6 Esfuerzo vertical en la zona de Abutment, Karzulovic [14]	55
Ecuación 7 Modelo de Regresión Logística, Escenario Base	113
Ecuación 8 Modelo de Regresión Logística, Nuevo Escenario	118