

INTEGRACIÓN DE SISTEMAS DE MONITOREO PARA DETERMINAR LA EVOLUCIÓN Y ZONA DE AFECTACIÓN DEL CRÁTER DE SUBSIDENCIA GENERADO POR MINERÍA SUBTERRÁNEA

Por: Gonzalo Alexis Cruzat Muñoz

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Concepción para optar al Título de Geofísico

Octubre 2022 Concepción, Chile

Profesor Guía: Arturo Belmonte V.

© 2022, Gonzalo Alexis Cruzat Muñoz

La información que esta Memoria recoge y contiene respecto de las operaciones y actividades de Anglo American Chile Ltda. y/o de cualquiera de las divisiones mineras e industriales operativas, así como la integridad e interpretación de la información, los análisis y conclusiones derivadas de ella, sólo corresponden a su autor y, en consecuencia son de su exclusiva responsabilidad, por lo que no comprometen en forma alguna a Anglo American Chile Limitada, sus divisiones operativas o empresas propietarias, como tampoco a sus ejecutivos, profesionales o técnicos. Anglo American Chile Ltda. únicamente ha colaborado con el autor en facilitarle acceso a sus instalaciones e información para la realización de esta tesis y no tiene opinión ni participación alguna en su contenido.

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

AGRADECIMIENTOS

Un cariñoso agradecimiento a mis padres Jaime Hernán Cruzat Roa y Jimena Pilar Muñoz Alarcón por su apoyo incondicional y su ímpetu que me ha ayudado a salir adelante, además de sus innumerables consejos que cada día me permiten mejorar como persona. A mis hermanos que siempre me entregaron una alegría cuando me encontraba lejos de casa. A mis tíos, tías y primos y en especial a mi Mami Sara por ser un pilar importante en mi vida.

Un especial y cordial agradecimiento a Anglo American Chile Operación Los Bronces en especial a la Superintendencia de Geomecánica Los Bronces por darme la oportunidad de pertenecer a su equipo de trabajo y ayudarme a desarrollarme como persona y como profesional. En especial a Danko Díaz por permitirme estar en su equipo de trabajo, a mi tutor Renato Espinoza por estar siempre ahí y entregarme todo el apoyo posible para que este trabajo diera frutos, a Ramssey Barrera por ayudarme a cumplir mis objetivos y siempre levantarme el ánimo, a los centinelas por su ilimitada paciencia para apoyarme cada vez que lo necesite, a Manuela Cordova por darme ánimo y hacerme sentir acogido en el equipo, a Carlos Barros por su disposición a enseñarme, y a Exequiel Pizarro, Miguel Fernandez, Carmen Maldonado, Rafael Nuñez, Cristian Olivares, Eduardo Portilla por su buena onda y siempre responder mis dudas por mínimas que fueran.

A mis amigos Vicente Quinteros (Vichin), Diego Canullan (Toki), Sergio Uribe (Checho), Sebastian Ortiz (Seba), Fabian Pachecho (Fabi), Javiera Saavedra (Javi), Juan Pablo Quiroga (Jota pe), María Fernanda Hadad (Mafe), Matías Castillo (Mati) y Javier Campos (Javier) aquellos que me conocen de hace años y que siempre estuvieron ahí para hacerme reír y darme ánimos de seguir adelante en todo.

Resumen

Los cráteres son depresiones topográficas generadas por distintos mecanismos, en la presente memoria se verá específicamente la situación de un cráter generado por el desarrollo de minería subterránea, la cual para la extracción de mineral utiliza métodos de hundimiento. Estos métodos se caracterizan por usar la fuerza de gravedad y la acción de los esfuerzos internos de la roca para debilitar el macizo rocoso y hacer que este caiga para su posterior extracción.

La expansión del cráter de subsidencia se ve influenciada por los trabajos mineros llevados a cabo tanto en la zona subterránea como en la superficie además esta no se detiene hasta algunos años posteriores a la finalización de los trabajos mineros. La constante expansión y los continuos trabajos alrededor del cráter obligan a tener un control permanente de la zona con el objetivo de mantener la seguridad en un estándar alto y no poner en riesgo a las personas y a la infraestructura dispuesta en el lugar.

Actualmente en la Operación Los Bronces se tienen fases trabajando al lado del cráter de subsidencia, debido a esto es que se requiere mantener un plan de monitoreo geotécnico, el cual permita mantener un ambiente de trabajo seguro para personas y equipos, al mismo tiempo permitir la continuidad en las operaciones para alcanzar los planes de producción comprometidos.

En esta memoria se analizan los datos adquiridos por distintos sistemas de monitoreo y se integran los resultados de manera de poder tener una caracterización completa del comportamiento actual del cráter, y sus implicancias en la operación a futuro. Los distintos sistemas de monitoreo entregaran en su mayoría información de los desplazamientos de material tanto en superficie como en algunas zonas subterráneas.

El trabajo está orientado en correlacionar la información obtenida por los distintos sistemas de monitoreo disponible, con el objeto de asegurar que en las zonas operativas las condiciones del macizo rocoso se mantienen estable.

Abstract

Craters are topographic depressions generated by different mechanisms, in this report we will specifically look at the situation of a crater generated by the development of underground mining, which uses sinking methods for the extraction of ore. These methods are characterized by using the force of gravity and the action of the internal forces of the rock to weaken the rock mass and cause it to fall for subsequent extraction.

The expansion of the subsidence crater is influenced by the mining works carried out both underground and on the surface and does not stop until some years after the end of the mining works. The constant expansion and continuous work around the crater require permanent control of the area to keep safety at a high standard and not put people and the infrastructure in place at the site at risk.

La Operación Los Bronces currently has phases working next to the subsidence crater, so a geotechnical monitoring plan is required to maintain a safe working environment for people and equipment, while at the same time allowing continuity in operations to achieve the committed production plans.

This report analyzes the data acquired by different monitoring systems and integrates the results in order to have a complete characterization of the subsidence crater area, with this it will be possible to know the current behavior of the crater. The different monitoring systems will mostly provide information on the displacement of material both on the surface and in some underground areas.

This work is oriented to correlate the information obtained by the different monitoring systems available, with the purpose of assuring that in the operative zones the conditions of the rock mass remains stable.

Índice general

A	GRADECIMIENTOS	Ι
Re	esumen	II
Ał	bstract	III
1.	Introducción 1.1. Objetivo general 1.1.1. Objetivos específicos	1 2 2
2.	Antecedentes generales 2.1. Anglo American Chile 2.1.1. Anglo American, Operación Los Bronces 2.1.1. Geología del yacimiento Río Blanco, área Operación Los Bronces 2.1.1.2. Ubicación geográfica Operación Los Bronces 2.1.1.3. Clima 2.1.1.4. Explotación actual 2.1.1.5. Características cráter de subsidencia 2.1.1.6. Explotación mina subterránea	3 3 4 5 8 8 9 10 12
3.	Cráter de subsidencia 3.1. Métodos de extracción por hundimiento 3.1.1. Panel Caving 3.1.2. Variantes de explotación con el método Panel Caving 3.1.3. Evolución del caving y formación de un cráter de subsidencia 3.2. Cráter de subsidencia 3.2.1. Efecto de la topografía 3.2.2. Efecto de la geología 3.2.3. Morfología de un cráter de subsidencia 3.2.3.1. Morfología vista en planta 3.2.3.2. Morfología con vista en una sección vertical	13 13 14 17 19 24 25 25 26 26 26 27
4.	Sistemas de monitoreo 4.1. Monitoreo satelital inSAR	30 30

	4.2.	Monitoreo con radares	34
	4.3.	Teodolitos y el monitoreo de prismas	38
	4.4.	Time domain reflectometry (TDR)	42
	4.5.	Sensores Geo4sight	44
		4.5.1. RSSI (Received Signal Strength Indicator)	45
		4.5.2. Tilt data	46
		4.5.3. Tilt arrow	47
		4.5.4. Tilt Delta	48
		4.5.5. Tilt History	49
		4.5.6. Tilt Direction	50
5.	Met	odología	51
	5.1.	Recolección v análisis de la información	51
	5.2.	Procesamiento de los datos	51
		5.2.1. Monitoreo satelital	52
		5.2.2. Time domain reflectometry (TDR)	54
		5.2.3 Teodolitos y el monitoreo de prismas	55
		5.2.4 Sensores Geo4sight	57
		5.2.5. Monitoreo con radares	58
0	D		~ 1
6.	Res	Iltados Maritarea actalital	61
	0.1.		01
	0.2.	Monitoreo con radares	00
		6.2.1. Monitoreo hacia las fases Inflernillo 5 y 6	00
		6.2.1.1. Primer proyecto	60 70
		6.2.1.2. Segundo proyecto	70
		6.2.2. Monitoreo hacia la fase Donoso 2	73
		6.2.2.1. Primer proyecto	73
		6.2.2.2. Segundo proyecto	76
		6.2.2.3. Tercer proyecto	79
	6.3.	Resultado del monitoreo con teodolitos y los prismas	82
	6.4.	Resultado del monitoreo con cables TDR	88
	6.5.	Resultados del monitoreo con Sensores Geo4sight	91
7.	Disc	usión	95
8.	Con	clusión 1	00
D	f	1	ഹ
Re	eierei	cias 1	02
A	pénd	ces 1	03
А.	Res	ltados 1	03
	A1.	Gráficos de los desplazamientos acumulados para el primero periodo	
		de tiempo	.03
	A2.	Gráficos de los desplazamientos acumulados para el segundo periodo de tiempo.	.07

V

Índice de cuadros

5.2.1.Se muestra un tabla referencial de la composición de columnas de los datos trabajados en formato ".CSV". El monitoreo satelital no contiene la columna de "Nombre instrumento".	52
6.1.1.En la tabla se muestran los resultados para cada zona. Los números	
de la primera columna se relacionan con los números de las zonas	
de la Figura (6.1.2)	63
6.1.2.En la tabla se muestran los resultados para cada zona. Los números	
de la primera columna se relacionan con los números de las zonas	
de la Figura $(6.1.3)$.	65
6.3.1.La tabla muestra los 3 grupos de prismas estudiados.	82
6.5.1.La tabla muestra los 7 marcadores que mas se movieron. Los	
marcadores se comienzan a contar desde el fondo del pozo (ej: el	
marcador 1 se encuentra al fondo de todo el pozo)	92
6.5.2 La tabla muestra los 7 marcadores que mas se movieron. Los	01
marcadoros se comienzan a contar desde el fonde del pozo (ej: el	
marcadores se connenzan a contar desde el rondo del pozo (ej. el	02
marcador i se encuentra ar tondo de todo el pozo).	95

Índice de figuras

2.1.1.Sección al este de Santiago que ilustra las formaciones Abanico y Farellones, Fuente: Codoy (2012)	6
2.1.2.Mapa en planta con unidades litológicas presentes en el Rajo Los Bronces, además presenta las estructuras mayores o principales	7
2.1.3.Mapa que muestra la ubicación y la ruta de acceso a la Operación	'
Los Bronces	8
alrededor del cráter de subsidencia.	9
2.1.5.Las inguras intestrain la topografia y una loto aerea del crater de subsidencia.	10
 2.1.6.La figura muestra las cotas al fado sur del crater (fases inferinito 5 y 6). 2.1.7.La figura muestra las cotas al lado norte del cráter (fase Donoso 2). 2.1.8 Vista en planta da el plana da la mina subterránea y del plan da 	10 11
explotación de los últimos y próximos años de la misma.	12
3.1.1.Representación en 3D del nivel de producción para malla típica de Panel Caving utilizada en la mina subterránea. Fuente: Blanco (2013).	15
3.1.2.Propagación del caving hacia la superficie debido a la extracción de mineral en una minería por hundimiento de paneles. Fuente: Hustrulid (1982).	16
3.1.3.Explotación con el método Panel Caving usando la variante de Hundimiento convencional, Fuente: Cavieros (2008)	17
3.1.4.Explotación con el método Panel Caving usando la variante de	11
Hundimiento Previo. Fuente: Cavieres (2008).	17
3.1.5.Explotación con el método Panel Caving usando la variante de Hundimiento Avanzado. Fuente: Cavieres (2008).	18
3.1.6.Mecánica de la formación de cráter de subsidencia asociado a minería por métodos de hundimiento. Modificado de Karzulovic (1999)	22
3.1.7.Efecto del avance del frente de socavación en el "volumen activo" de roca que tiende a desplazarse hacia la cavidad. Modificado de Kargulovia (1990)	
$\mathbf{N}_{\mathbf{a}\mathbf{I}} \mathbf{\Delta}_{\mathbf{u}\mathbf{I}} \mathbf{O}_{\mathbf{v}\mathbf{I}} \mathbf{U} \left(\mathbf{I} 3 3 3 \right), \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots $	∠0

 3.2.1.Posibles morfologías en planta de un cráter de subsidencia asociado a minería masiva por métodos de hundimiento : (a) forma tipo circular, (b) forma tipo herradura, (c) forma tipo rosquilla. Fuente: (Karzulovic, 1999). 3.2.2.Esquema ilustrativo de los parámetros utilizados para describir la morfología de un cráter de subsidencia. Fuente: (Karzulovic, 1999). 	26 27
 4.1.1.a) Esquema de geometría de adquisición radar, geometría de vuelo y órbita. b) Proyección de movimiento real en línea de visión del terreno LOS. Efecto de acercamiento y alejamiento respecto al satélite. Fuente: Sánchez et al. (2016). 4.2.1.Radar IBIS-FMT. 4.2.2.Radar IBIS-ArcSAR. 4.3.1.Figura referencial de un teodolito. 4.3.2.Figura referencial de un prisma. 4.3.3.Ángulo vertical o cenital de un prisma (vista en plano vertical). 4.3.4.Ángulo horizontal o azimutal de un prisma (vista en planta). 4.3.5.Distancia inclinada entre la estación y el prisma. 4.4.1.Esquema que ilustra la composición de un sistema de monitoreo con TDR. Modificado de: O'Connor and Murphy (1997). 4.5.1.Esquema de la disposición de los sensores o marcadores en un pozo para el monitoreo del macizo rocoso en un borde cráter. 4.5.3.Se muestra la visualización de los datos en el software GeoHIVE. Fuente: Manual del GeoHive. 4.5.4.Flechas de inclinación en la vista 3D. No hay datos de inclinación disponibles para cada segundo Marcador, por lo que se muestran en azul. Fuente: Manual del GeoHive. 4.5.5.Gráficos del Tilt delta. Fuente: Manual del GeoHive. 4.5.6.Vector de orientación del marcador. Fuente: Manual del GeoHive. 4.5.8.Gráfico del Tilt direction. Fuente: Manual del GeoHive. 	32 36 37 38 39 40 43 44 45 46 47 48 49 49 50
 5.2.1.Imagen ilustrativa de la selección de zonas de interés. 5.2.2.La figura muestra la época invernal encerrada en verde. 5.2.3.La figura muestra con círculos negros el cambio en la cantidad de puntos entre un periodo y otro. El primer periodo (izquierda) va desde 01/01/2020 hasta el 24/06/2021 y el segundo (derecha) va desde 	52 53
01/01/2021 hasta el 02/05/2022	54
del comportamiento del TDR	$54 \\ 55$
5.2.6.Los gráficos muestran el módulo del vector de desplazamiento y el desplazamiento vertical del prisma de referencia D236.	56

5.2.7.En el gráfico se muestra un tipo de ruido por el movimiento de la	
estación y que se denominó "saltos"	56
5.2.8 Ubiención de los pozos de sensores Coolsight	57
5.2.0. Dicación de los pozos de sensores Geo4signt.	57
5.2.9.En la imagen se aprecia un area y un punto seleccionado	58
5.2.1 Wbicación de los radares que monitorean el cráter de subsidencia.	
La letra Y indica el norte geográfico.	59
6.1.1.Escala de la velocidad media anual para las figuras ($6.1.2$) y ($6.1.3$).	61
6.1.2.Zonas de interés seleccionadas alrededor del cráter de subsidencia	
para el periodo 01/01/2020 hasta el 24/06/2021	62
6.1.3 Zonas de interés seleccionadas alrededor del cráter de subsidencia	
nara al pariodo 01/01/2021 hasta al 02/05/2022	64
para el periodo $01/01/2021$ hasta el $02/05/2022$.	04
0.2.1.La ngura muestra 4 areas seleccionas para el primer proyecto.	00
6.2.2.El gráfico muestra los desplazamiento en milímetros de las 4 áreas	
seleccionadas	67
6.2.3.La figura muestra 3 zonas seleccionadas sobre el bloque activo	67
6.2.4.El gráfico muestra los desplazamientos en milímetros de las 3 áreas	
seleccionadas.	68
6.2.5 La figura muestra 15 puntos seleccionados en toda la zona	
monitoroada	68
6.2.6 Desployerientes en milimetres de les 15 nuntes seleccione des	60
0.2.0.Desplazamientos en minimetros de los 15 puntos seleccionados	09
6.2.7.La figura muestra 4 àreas seleccionadas para el segundo proyecto.	70
6.2.8.El gráfico muestra los desplazamientos en milímetros de las 4 áreas	
seleccionadas	70
$6.2.9$.La figura muestra 3 zonas seleccionadas del bloque activo. \ldots	71
6.2.1Œl gráfico muestra los desplazamientos en milímetros de las 3 áreas	
seleccionadas.	71
6.2.1 La figura muestra los 15 puntos seleccionados.	72
6.2.1 El gráfico muestra los desplazamientos de los 15 puntos seleccionados.	72
6.2.1 La figura muestra las 5 áreas seleccionadas.	73
6.2.14El gráfico muestra los desplazamientos de las 5 áreas seleccionadas.	73
6.2.1 E a figura muestra los puntos seleccionados desde el 1 al 6	74
6.2.1 d a figura muestra los puntos seleccionados desde el 7 al 0.	74
6.2.17 a figura muestra los puntos seleccionados desde el 10 al 15	75
6.2.1 El métric los demostre los demos seleccionados desde el 10 al 15	75
0.2.1 del granco muestra los despiazamiento de los 15 puntos seleccionados.	10 70
0.2.19La figura muestra las 5 areas seleccionadas.	70
6.2.2 Desplazamientos de las áreas generales seleccionadas.	76
$6.2.2$ La figura muestra los puntos seleccionados desde el 1 al 6. \ldots	77
$6.2.2$ La figura muestra los puntos seleccionados desde el 7 al 9. \ldots	77
$6.2.23La$ figura muestra los puntos seleccionados desde el 10 al 15. \dots	78
6.2.24 El gráfico muestra los desplazamientos de los 15 puntos seleccionados.	78
6.2.2£La figura muestra las 5 áreas seleccionadas	79
6.2.2 Desplazamientos de las 5 áreas generales.	79
6.2.27 La figura muestra los puntos seleccionados desde el 1 al 6	80
6.2.28 a figura muestra los puntos seleccionados desde el 7 al 9	80
6.2.20 a figura muestra los puntos soloccionados desde el 10 al 15	Q1
0.2.2 and ingula indestita tos puntos seleccionados desde el 10 al 19	01

6.2.3 Desplazamientos de los 15 puntos seleccionados.816.3.1.La figura muestra la ubicación del primer grupo de prismas.82
6.3.2.Los gráficos muestran el módulo del vector de desplazamiento, el desplazamiento en el eje vertical respectivamente para el primer
grupo de prismas
6.3.3.La figura muestra la ubicación del segundo grupo de prismas 84
6.3.4.Los gráficos muestran el módulo del vector de desplazamiento, el desplazamiento en el eje vertical respectivamente para el segundo
grupo de prismas
6.3.6.Los gráficos muestran el módulo del vector de desplazamiento, el desplazamiento en el eje vertical respectivamente para el tercer
grupo de prismas
6.4.1.La figura muestra la ubicación de los 4 TDR analizados 88
6.4.2.El gráfico muestra el comportamiento del TDR 07
6.4.4.El gráfico muestra el comportamiento del TDR 02.
6.4.5.El gráfico muestra el comportamiento del TDR 09 90
6.5.1.La figura muestra la ubicación de los pozos 3 y 4
6.5.2.El gráfico muestra el Tilt History del pozo 3
6.5.3.El gráfico muestra el Tilt History del pozo 4
respectivamente. Las lineas verde, amarillo v rojo tienen la finalidad
de poder diferenciar los movimientos por su magnitud
7.0.1 La figura muestra en verde las zonas estables y con flechas reias el
avance de la subsidencia
7.0.2.La figura muestra en verde las zonas estables y en rojo las donde
existe una inestabilidad por subsidencia. $\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots 97$
7.0.3.La figura muestra en verde las zonas estables y con nombres en
amarillo el monitoreo usado para llegar a ese resultado. \dots 98 704 La figura muestra en verde las zonas estables y en rojo las
zonas inestables. Se relacionan los resultados obtenidos por el
monitoreo satelital, monitoreo de radares, el monitoreo de prismas,
el monitoreo en el subsuelo de los cables TDR y los sensores Geo4 sight. 99
A1.1.Gráfico de los desplazamientos acumulados de la zona número 1 o
llamada Zona norte del cráter de subsidencia. (Ver Figura 6.1.2) 103
A1.2.Gráfico de los desplazamientos acumulados de la zona número 2 o
llamada Ladera noreste del cráter de subsidencia. (Ver Figura 6.1.2). 104
llamada Zona noroeste del cráter de subsidencia. (Ver Figura 6.1.2) 104
A1.4.Gráfico de los desplazamientos acumulados de la zona número 4 o
llamada Zona Infiernillo inferior. (Ver Figura 6.1.2) 104
A1.5.Gráfico de los desplazamientos acumulados de la zona número 5 o
llamada Zona interior del cráter de subsidencia. (Ver Figura 6.1.2). 105

A1.6.Gráfico de los desplazamientos acumulados de la zona número 6 o	
llamada Zona Infiernillo superior. (Ver Figura 6.1.2).	105
A1.7.Gráfico de los desplazamientos acumulados de la zona número 7 o	
llamada Zona sur 1. (Ver Figura 6.1.2).	105
A1.8.Gráfico de los desplazamientos acumulados de la zona número 8 o	
llamada Zona sur 2. (Ver Figura 6.1.2).	106
A1.9.Gráfico de los desplazamientos acumulados de la zona número 9 o	
llamada Zona sur 3. (Ver Figura 6.1.2).	106
A2.1.Gráfico de los desplazamientos acumulados de la zona número 1 o	
llamada Zona noroeste del cráter de subsidencia. (Ver Figura 6.1.3).	.107
A2.2.Gráfico de los desplazamientos acumulados de la zona número 2 o	
llamada Ladera noreste del cráter de subsidencia para el segundo	
periodo. (Ver Figura 6.1.3). \ldots	107
A2.3.Gráfico de los desplazamientos acumulados de la zona número 3 o	
llamada Zona o este del cráter de subsidencia. (Ver Figura 6.1.3). \hfill	108
A2.4.Gráfico de los desplazamientos acumulados de la zona número 4	
o llamada Zona Infiernillo inferior para el segundo periodo. (Ver	
Figura 6.1.3). \ldots	108
A2.5.Gráfico de los desplazamientos acumulados de la zona número 5	
o llamada Zona interior del cráter de subsidencia para el segundo	
periodo. (Ver Figura 6.1.3). \ldots	108
A2.6.Gráfico de los desplazamientos acumulados de la zona número 6 o	
llamada Zona sur 1 para el segundo periodo. (Ver Figura $6.1.3$).	109
A2.7.Gráfico de los desplazamientos acumulados de la zona número 7 o	
llamada Zona sur 2 para el segundo periodo. (Ver Figura $6.1.3$).	109
A2.8.Gráfico de los desplazamientos acumulados de la zona número 8 o	
llamada Zona sur 3 para el segundo periodo. (Ver Figura $6.1.3$).	109
A2.9.Gráfico de los desplazamientos acumulados de la zona número 9 o	
llamada Zona sur 4 para el segundo periodo. (Ver Figura 6.1.3).	110

Capítulo 1

Introducción

La Operación Los Bronces es un yacimiento de cobre y molibdeno perteneciente a la compañía minera Anglo American Chile. Actualmente presenta una interacción con un cráter el cual es monitoreado por la Superintendencia de Geomecánica de Operación Los Bronces, con el objetivo de poder realizar una actividad minera de forma segura.

Los cráteres son depresiones o cavidades abiertas en la tierra, tienen distintos orígenes como lo pueden ser por explosiones, actividad volcánica, subsidencia entre otros. El siguiente trabajo se centrará en la actividad de un cráter producido por subsidencia. La formación de este cráter se relaciona al uso de métodos de hundimiento en la actividad minera subterránea. Se caracterizará la actividad que ha tenido el cráter de subsidencia en superficie a partir de los distintos sistemas de monitoreo empleados por la Superintendencia de Geomecánica de Operación Los Bronces con el objetivo de poder determinar como la actividad del cráter podría afectar la actividad minera de la Operación Los Bronces.

En la actualidad se tienen algunas fases de la Operación Los Bronces trabajando al lado de cráter, es por esto que la recopilación de información de los distintos sistemas de monitoreo permitirá entender el comportamiento actual del cráter.

El trabajo recopilara información de sistemas de monitoreo satelital, radar, sistemas de monitoreo topográfico como lo son el monitoreo de prismas con teodolitos, cables TDR (time domain reflectometry) y sensores Geo4sight. Esta información se correlacionará en base a los distintos resultados para obtener una conclusión respecto del comportamiento del macizo rocoso adyacente al cráter.

1.1. Objetivo general

El objetivo general consiste en el análisis e integración de los datos obtenidos por distintos sistemas de monitoreo, los cuales se encuentran presentes en la zona del cráter de subsidencia y a partir de esto poder generar un marco referencial de la situación actual del cráter, y un plan de seguridad en caso de que lo requiera, permitiendo un desarrollo exitoso en las fases que colindan con el cráter de subsidencia.

1.1.1. Objetivos específicos

- Recopilar información relevante de la Operación Los Bronces y sobre la subsidencia generada por minería subterránea.
- Indagar sobre los distintos tipos de monitoreo usados en el cráter de subsidencia.
- Analizar los datos obtenidos por los distintos sistemas de monitoreo.
- Definir zonas de afectación del cráter.
- Generar la integración de datos de los distintos sistemas de monitoreo.

Capítulo 2

Antecedentes generales

2.1. Anglo American Chile

Anglo American es una empresa minera mundial con una cartera de activos mineros presentes en África, Europa, Norte y Sudamérica, Australia y Asia. Su casa matriz se encuentra en Londres, Reino Unido.

Los principales minerales que extrae son: platino, diamantes, cobre, níquel, mineral de hierro y carbón.

El Grupo Anglo American comenzó sus operaciones en Chile en 1980, adquiriendo 40% de la Empresa Minera de Mantos Blancos S.A., la que explotaba el yacimiento del mismo nombre en la II Región. En 1984 se convirtió en el socio mayoritario de esta empresa.

Entre 1988 y 1992 se hizo efectiva la opción de compra por el yacimiento de Mantoverde, ubicado en la III Región, el cual pasó a formar parte de Empresa Minera de Mantos Blancos S.A.

En 1996, Anglo American adquirió 44 % de la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi, cuyo yacimiento se encuentra en la I Región.

En el 2002, adquirió la Compañía Minera Disputada de Las Condes, hoy Anglo American Sur S.A. integrando a sus operaciones las divisiones El Soldado, Chagres y Los Bronces.

2.1.1. Anglo American, Operación Los Bronces

Los Bronces es una mina de cobre y molibdeno que explota a rajo abierto parte del yacimiento Río Blanco.

Los Bronces fue descubierto en 1867 y ese mismo año comenzó su explotación. Luego en 1978 ENAMI (Empresa Nacional de Minería) vendió Los Bronces a Exxon por US\$ 112M, finalmente la mina fue adquirida en el 2002 por Anglo American por la suma de US\$ 1.3B.

El cobre y molibdeno que se extrae es transportado por un mineroducto de 56 kilómetros a la planta de flotación Las Tórtolas, en la que se produce cobre y molibdeno contenido en concentrados. Además, en la mina se produce cobre en cátodos.

En 2020, Los Bronces produjo 324.700 toneladas de cobre fino, entre cátodos de alta pureza y cobre contenido en concentrado.

2.1.1.1. Geología del yacimiento Río Blanco, área Operación Los Bronces

Los Bronces es un yacimiento de cobre y molibdeno de gran tamaño situado en la Cordillera Central de Chile a una altura media de 3.500 m.s.n.m. Forma parte del yacimiento de pórfido de cobre Río Blanco.

Las reservas de Los Bronces al 1 de enero de 2021 son de 1.324.437 [Kton] 0,55 %TCu para el proceso de flotación de sulfuros y 505.007 [Kton] 0,28 %TCu para el proceso de lixiviación de sulfuros. Los recursos minerales, además de las reservas declaradas son 3.569.316 [Kton] 0,45 %CuT para el proceso de flotación de sulfuros.

Las rocas que contienen la mineralización corresponden a secuencias volcánicas de la Formación Farellones (23 - 17 Ma) intruidas por rocas plutónicas del Batolito San Francisco (16 - 8 Ma).

El yacimiento mineral está asociado a la localización de un complejo sistema de intrusiones porfídicas y brechas hidrotermales datadas entre 7 - 4,3 Ma.

Con posterioridad a la mineralización, se produce la intrusión de un pórfido (<7 Ma) y un complejo de rocas volcánicas (~ 5 Ma) - diatrema (4,9 - 4,3 Ma).

En la mina Los Bronces, el mayor contenido de mineral está relacionado principalmente con las brechas hidrotermales que crean un cuerpo elíptico de 2 [km] de largo, 0,7 [km] de ancho y 1 [km] de profundidad.

A escala de distrito, el principal complejo de brechas está orientado de $N10^{\circ}$ a $N15^{\circ}W$, con una distancia de 9 [km] entre los dos principales cuerpos de brechas conocidos, Los Bronces y Los Sulfatos.

Los cuerpos de brecha, cortan y son cortados por unidades de pórfidos. Se diferencian 9 tipos de brechas, clasificadas y diferenciadas entre sí por la composición de la matriz, tipos de clastos y la relación en volumen matriz-clastos. La turmalina es el principal componente de la matriz y en general los clastos tienen una composición similar a la de las rocas de caja. Por sus características geológicas se postulan como mecanismos de emplazamiento de las brechas a fenómenos del tipo explosivo y de colapso.



Figura 2.1.1: Sección al este de Santiago que ilustra las formaciones Abanico y Farellones. Fuente: Godoy (2012).

La mineralización de interés económico es del tipo sulfuros y está alojada aproximadamente en un 60 % en las brechas, principalmente en la matriz. El 40 % restante de la mineralización se encuentra en las rocas de caja en forma diseminada y stockwork. Los principales sulfuros son calcopirita (mayoritaria), calcosina, covelina, bornita y molibdenita. La razón promedio de pirita a sulfuros de cobre es 2:1.

Las unidades litológicas principales, que se encuentran en el sector del rajo Los Bronces, corresponden a las que se indican a continuación:

- Cuarzo Monzonita (QM)
- Andesita (AND)
- Riolita (RIO)
- Brecha Occidente (BXO)
- Brecha Central (BSC)
- Brecha Anhidrita
- Brecha Infiernillo (BXI)
- Brecha Fantasma (BXF)
- Brecha Donoso (BXD)

Las estructuras mayores o principales están orientadas en el rango $N50^{\circ}E$ a EW. En general se observa que en la parte sur del yacimiento predomina la orientación NE, mientras que, hacia el sector norte, se va acentuando el predominio EW. Un importante porcentaje de las estructuras posee un rumbo que fluctúa entre $N10^{\circ}W$ y $N30^{\circ}W$. Esta tendencia está asociada a diques, vetas y pórfidos tardíos.

En general estas estructuras se encuentran mineralizadas y afectan a todas las litologías del sector.

Figura 2.1.2: Mapa en planta con unidades litológicas presentes en el Rajo Los Bronces, además presenta las estructuras mayores o principales.

2.1.1.2. Ubicación geográfica Operación Los Bronces

La Operación Los Bronces se encuentra ubicada a 70 [km] al noreste de la ciudad de Santiago, a 3.500 m.s.n.m. entre las coordenadas geográficas 33°08′ latitud sur y 70°15′ longitud oeste. La principal ruta de acceso hacia la Operación Los Bronces es el camino Santiago - Farellones (G-21) hasta aproximadamente Corral Quemado, kilómetro 17, donde comienza el camino hacia el Paso Marchant y Los Bronces (G-245).



Figura 2.1.3: Mapa que muestra la ubicación y la ruta de acceso a la Operación Los Bronces.

2.1.1.3. Clima

La zona de estudio presenta un clima de "estepa fría de alta montaña", con características particulares de extrema sequedad del aire y con oscilaciones térmicas similares al clima de "tundra de alta montaña". La temperatura anual oscila entre $-13^{\circ}C$ y $25^{\circ}C$ dependiendo la época.

La humedad relativa del aire es de un 15% hasta un 90% con una media inferior al 50% de humedad relativa. Las rachas de viento dominan en dirección NW-SE. En invierno, en condiciones extremas, pueden alcanzar hasta los 100 kilómetros por hora.

2.1.1.4. Explotación actual

Las fases actuales alrededor del cráter de subsidencia son Donoso 2 (DON02), Infiernillo 5 (INF05) e Infiernillo 6 (INF06). Como se ve en la Figura (2.1.4) las fases están cerca del cráter, es por esto que el presente estudio busca recabar información de los distintos sistemas de monitoreo geomecánico presentes en la zona de estudio.



Figura 2.1.4: Vista en planta del pit actual de Operación Los Bronces 2022 alrededor del cráter de subsidencia.

Cráter de subsidencia

2.1.1.5. Características cráter de subsidencia

A continuación, se presentan las características del cráter que permiten dimensionar el tamaño real del mismo y su implicancia en la Operación Los Bronces.





(b) Foto aérea del cráter de subsidencia.

Figura 2.1.5: Las figuras muestran la topografía y una foto aérea del cráter de subsidencia.

Como se aprecia en las figuras anteriores el lado más largo del cráter es kilométrico y está en contacto con la Operación Los Bronces. A continuación, se muestran 2 figuras que permiten dimensionar la profundidad del cráter respecto a las fases colindantes:



Figura 2.1.6: La figura muestra las cotas al lado sur del cráter (fases Infiernillo 5 y 6).



Figura 2.1.7: La figura muestra las cotas al lado norte del cráter (fase Donoso 2).

En ambas figuras se logra observar la cercanía de los trabajos llevados a cabo por la Operación Los Bronces.

2.1.1.6. Explotación mina subterránea

La explotación actual de la mina subterránea que genera la subsidencia comprende el lado oeste y sur. Con el paso de los años se espera avanzar hacia el sur con la explotación e ir abandonando la zona norte (Ver Figura (2.1.8)).



(a) Plano de explotación mina subterránea. (b) Plan de explotación mina subterránea.

Figura 2.1.8: Vista en planta de el plano de la mina subterránea y del plan de explotación de los últimos y próximos años de la misma.

Comprender como la explotación avanza en la mina subterránea nos entregara una idea de cómo evaluar la evolución de la subsidencia a futuro y como se relaciona con la misma explotación.

Capítulo 3

Cráter de subsidencia

3.1. Métodos de extracción por hundimiento

Para la extracción de mineral en minería subterránea en particular para la mina que genera el cráter, se emplean métodos basados en el hundimiento del macizo rocoso por el efecto de la fuerza de gravedad en conjunto con los esfuerzos internos de la roca. De forma sencilla se puede definir que la metodología de extracción del mineral mediante el hundimiento está en quitar la base de "apoyo" del mineral y hacer que este caiga debido a la fuerza antes mencionada. Una vez que el apoyo es retirado el bloque por extraer comienza su socavación hasta lograr el desplome completo del mineral.

En general esta forma de explotación se aplica en mega yacimientos, como lo son los pórfidos cupríferos, que poseen leyes relativamente bajas. Además, se basa en la minería de gran escala, con una alta recuperación de reservas y con una alta tasa de producción y mecanización.

Entre los métodos de explotación subterráneos, los basados en el hundimiento son los que poseen un menor costo de extracción, a pesar de que requieren un gran número de labores mineras anteriores a la explotación en sí.

Este método de explotación genera una expresión en superficie que se manifiesta a través de un cráter sobre la zona de explotación, debido al fenómeno de subsidencia.

3.1.1. Panel Caving

El Panel Caving o hundimiento progresivo de paneles es la variante utilizada para extraer el mineral por método de hundimiento en la mina subterránea ubicada debajo del cráter de subsidencia. Una de las diferencias entre el Block y el Panel Caving es que en este último se avanza con la explotación a través de una línea de avance denominada frente de hundimiento o socavación, en cambio, para el Block Caving se aplica el hundimiento a bloques determinados.

Dentro del diseño de esta metodología de explotación se tienen los siguientes niveles desarrollados, aplicados en este caso a la mina subterránea, que son (Fuente: Blanco (2013)):

- Nivel de Hundimiento (NH): Este nivel cuenta con galerías de hundimiento (GH) o de socavación que son paralelas entre sí. En este nivel también se desarrollan "cruzados" que conectan las galerías de hundimiento.
- Nivel de Producción (NP): Aquí se encuentran las galerías o calles de producción (CP), que al igual que las galerías de hundimiento son paralelas entre sí. También existen galerías que se intersecan con las de producción dependiendo de la malla de extracción aplicada, y que son paralelas unas de otras, estas se denominan galerías zanjas o brazos de producción. En las galerías se encuentran los puntos de extracción de este método de explotación y las bateas.
- Subnivel de Ventilación (SNV): Acá tenemos galerías de inyección y extracción de aire, desde donde se desarrollan chimeneas hacia los distintos niveles.
- Nivel de Reducción (NC): Corresponde a un nivel ubicado abajo del Subnivel de Ventilación. En este NC existen cámaras de picado en donde el mineral proveniente del Nivel de Producción es recibido. En estas cámaras existen parrillas con las cuales es controlada la granulometría del mineral, que 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, sería reducida por un martillo picador posicionado en estas salas de control, hasta que pasase completamente por la parrilla.
- Nivel de Transporte (NT): Conjunto de galerías de carguío y transporte.

CP: Galería o Calle de Producción BP: Galería Zanja o Brazo de Producción

En estas galerías se encuentran los buzones de descarga, que son aquellas infraestructuras que alimentan los camiones.

Figura 3.1.1: Representación en 3D del nivel de producción para malla típica de Panel Caving utilizada en la mina subterránea. Fuente: Blanco (2013).



La secuencia de explotación, después de haber realizado la preparación, comienza con las tronaduras de zanjas y socavación en el Nivel de Hundimiento. Una vez realizadas estas, se comienza con el proceso del caving. El mineral fracturado cae en las zanjas anteriormente abiertas y se comienza a extraer el material por los puntos de extracción ubicados en el Nivel de Producción. La extracción se realiza con maquinaria de bajo perfil, denominada LHD (Load Haul Dump), que carga el mineral en estos puntos de extracción y lo lleva a puntos de vaciado ubicados en las calles de producción y desde donde se dirige al Nivel de Reducción para luego llegar al Nivel de Transporte.



Figura 3.1.2: Propagación del caving hacia la superficie debido a la extracción de mineral en una minería por hundimiento de paneles. Fuente: Hustrulid (1982).

3.1.2. Variantes de explotación con el método Panel Caving

Si consideramos la secuencia operacional de explotación, existen tres variantes en el Hundimiento por Paneles (Panel Caving):

 Hundimiento convencional: Corresponde a la secuencia donde en primer lugar se realiza el desarrollo y construcción de las galerías en niveles de producción y de hundimiento, luego la apertura de zanjas, siguiendo con la socavación del nivel de hundimiento y finalmente extracción del mineral (Figura: 3.1.3).



Figura 3.1.3: Explotación con el método Panel Caving usando la variante de Hundimiento convencional. Fuente: Cavieres (2008).

 Hundimiento previo (Pre-undercut): Corresponde a la secuencia donde se realiza el desarrollo de galerías de hundimiento, luego el proceso de socavación, siguiendo con el desarrollo de galerías en nivel de producción y apertura de bateas y finalmente proceso de extracción (Figura: 3.1.4).



Figura 3.1.4: Explotación con el método Panel Caving usando la variante de Hundimiento Previo. Fuente: Cavieres (2008).

• Hundimiento avanzado: Es una situación intermedia entre las dos

anteriores, donde se desarrollan las galerías en el nivel de hundimiento, luego viene el proceso de socavación, seguido del desarrollo de galerías en el nivel de producción, finalizando con la apertura de zanjas y posterior proceso de extracción (Figura: 3.1.5).



Figura 3.1.5: Explotación con el método Panel Caving usando la variante de Hundimiento Avanzado. Fuente: Cavieres (2008).

3.1.3. Evolución del caving y formación de un cráter de subsidencia

La mecánica del caving como la formación de un cráter de subsidencia se puede describir en los siguientes pasos (Fuente: Karzulovic (1999)):

- 1. Al socavar el Nivel de Socavación (UCL) se desarrolla una cavidad de tipo tabular que genera encima del macizo rocoso un volumen "activo", que tiende a desplazarse verticalmente hacia el interior de la cavidad. Además, por encima de la socavación se produce un desconfinamiento del macizo rocoso que facilita su degradación. Esta condición inicial o "inmediatamente post-socavación" se ilustra en el esquema a) en la Figura (3.1.6).
- 2. Dentro del volumen "activo" el macizo rocoso se quiebra y el material quebrado comienza a rellenar la cavidad, pero la extracción de mineral provoca una propagación hacia arriba del volumen "activo", como se ilustra en el esquema b) de la Figura (3.1.6). Los desplazamientos del macizo rocoso siguen siendo claramente verticales, pero comienzan a producirse algunos con componente horizontal. En superficie se producen asentamientos de tipo elástico.
- 3. El macizo rocoso continua quebrándose y el material quebrado sigue rellenando la cavidad, pero la extracción de mineral hace que continúe propagándose hacia arriba el volumen "activo". Los desplazamientos con componente horizontal hacia la cavidad comienzan a ser más notables en la parte inferior de las paredes de la cavidad. Esta condición se ilustra en el esquema (c) de la Figura (3.1.6).
- 4. El proceso continúa y la cavidad tiende a tomar una forma de "catedral". Dependiendo de la condición estructural, geomecánica y de esfuerzos, esta forma puede significar que se alcanzo una condición estable y la cavidad no sigue creciendo, a menos que se aumente la base de la socavación, o bien se produce una condición de mayor inestabilidad y se acelera el crecimiento de la cavidad. Esta condición se ilustra en el esquema (d) de la Figura (3.1.6), y permite postular la siguiente hipótesis:

Inicialmente el crecimiento de una cavidad generada por el caving será más o menos lineal, pero cuando la cavidad alcanza un cierto "volumen crítico"¹ su crecimiento dejará de ser lineal y, dependiendo de las condiciones estructurales, geomecánicas y de esfuerzos, podrá:

- Continuar creciendo a una tasa siempre decreciente, lo que se traduce en que la cavidad evolucionará hacia una forma estable y se detendrá el proceso de caving a menos que se aumente el área basal socavada y/o se introduzca otro cambio.
- Continuar creciendo a una tasa siempre creciente, lo que se traduce en una aceleración del caving y en que la cavidad crecerá hasta conectarse a la superficie.

En la medida que aumenta la esbeltez del crown-pillar existente entre el techo de la cavidad y la superficie del terreno, aumentan rápidamente las solicitaciones sobre éste, hasta que se produce la ruptura del crown-pillar y la conexión de la cavidad a superficie, debe señalarse que una vez que se produce la ruptura del crown-pillar y la conexión de la cavidad a superficie ocurre lo siguiente :

- Se genera una superficie libre que facilita el caving, lo que se traduce en una condición más benigna en lo referente a la sismicidad inducida por la minería.
- Si la conexión no se produce en el centro de la cavidad sino que en uno de sus extremos, entonces en los sectores del frente de socavación más alejados de la conexión a superficie es probable que se produzca un aumento en la magnitud del abutment stress² y lo contrario ocurrirá en los sectores más próximos a la conexión a superficie.
- 5. Al conectarse a superficie la cavidad se transforma en un cráter tipo chimenea, con un perímetro superficial pequeño y paredes subverticales, como se ilustra en el esquema (e) de la Figura (3.1.6). En esta condición el macizo rocoso tiende a desplazarse horizontalmente hacia la cavidad, y al mismo tiempo en la parte superior de las paredes, donde no se tiene el confinamiento del material quebrado, comienzan a producirse **problemas de estabilidad**.
- 6. La parte superior de las paredes se derrumba, comienza a ensancharse el

 $^{^1\}rm Este$ "volumen crítico" dependerá de la geología estructural, de las características geomecánicas del macizo rocoso, del estado tensional in situ y de las características de la minería.

²Esfuerzos en el Crown-pillar

perímetro del cráter en superficie y la inclinación media de sus paredes disminuye. Al continuar la extracción de mineral la columna de material quebrado que confina las paredes del cráter comienza a descender. Esta condición se ilustra en el esquema (f) de la Figura (3.1.6).

- 7. Continua el proceso de crecimiento del perímetro del cráter en la medida que se producen nuevas inestabilidades en la parte superior de sus paredes y disminuye la inclinación media de las mismas, pero la condición es cada vez más estable y la tasa de crecimiento del cráter es cada vez más lenta. Esta condición se ilustra en el esquema (g) de la Figura (3.1.6).
- 8. Finalmente se alcanza una condición de equilibrio estable, donde el perímetro del cráter ya prácticamente no aumenta y la inclinación de sus paredes permanece sin mayores cambios. Debe tenerse presente que alcanzar esta condición puede tardar varios años después del término de la extracción de mineral. Esta condición se ilustra en el esquema (h) de la Figura (3.1.6).



(a) Se desarrolla la socavación del UCL y se genera el volumen "activo".



(b) El material quebrado comienza a rellenar la cavidad. La extracción produce propagación del volumen "activo".



(C) El proceso continua. Desplazamientos horizontales en las paredes inferiores de la cavidad.



(d) La cavidad tiende a tomar una forma de "catedral" y puede : (1) estabilizarse y no continuar creciendo: o (2) continuar creciendo más rápidamente y definir Crown-pillar en superficie.



(e) Se produce la ruptura del crown-pillar; formándose un cráter tipo chimenea, de paredes sub-verticales. El macizo tiende a desplazarse horizontalmente hacia la cavidad.



(f) La parte superior de las paredes se derrumba, se ensancha el perímetro del cráter en superficie y disminuye la inclinación de sus paredes.



(g) Continua el crecimiento del perímetro del cráter y la disminución de la inclinación de sus paredes, pero la condición es cada vez más estable.



(h) Finalmente se alcanza una condición de equilibrio donde el cráter no sigue creciendo. Esto puede ocurrir varios años después del término de la extracción de mineral.

Figura 3.1.6: Mecánica de la formación de cráter de subsidencia asociado a minería por métodos de hundimiento. Modificado de Karzulovic (1999).
Lo anterior supone que permanece sin variación el área basal socavada, lo cual en la práctica no es cierto ya que a partir de un área socavada inicial se extenderá la socavación según una secuencia minera establecida para optimizar el negocio minero y que, al mismo tiempo, es geotécnicamente factible.

Conforme con esto, lo anteriormente expuesto respecto a la mecánica de la formación de un cráter de subsidencia resulta válido en la zona del perímetro "pasivo" de la socavación, pero en la zona "activa" o donde se produce el avance del frente de socavación el "volumen activo" tiende a ser comparativamente mayor y, también, a variar su geometría en forma más rápida (cada vez que avanza el frente de socavación y/o el frente de extracción). Esto se ilustra en la Figura (3.1.7). Fuente: (Karzulovic, 1999).



Figura 3.1.7: Efecto del avance del frente de socavación en el "volumen activo" de roca que tiende a desplazarse hacia la cavidad. Modificado de Karzulovic (1999).

3.2. Cráter de subsidencia

Como se mencionó anteriormente, la explotación con métodos de hundimiento produce un fenómeno de subsidencia en superficie, el cual con el tiempo crece a medida que la cavidad creada comienza a colapsar. La subsidencia se debe entender como la deformación del terreno en la vecindad de una excavación superficial o subterránea y, desde un punto de vista práctico, interesa evaluar la magnitud y extensión de esta subsidencia, así como también su probable evolución en el tiempo.

La minería por métodos de hundimiento define en la superficie del terreno una subsidencia que no es continua, sin embargo, para efectos prácticos la subsidencia generado por una minería por métodos de hundimiento puede considerarse definida por dos zonas o sectores principales (Karzulovic (1999)):

- Cráter de subsidencia: Correspondiente al cráter mismo; cuya base corresponde al piso del Nivel de Socavación (UCL), y cuyo perímetro queda definido por las paredes del cráter. La inclinación respecto a la horizontal de una línea imaginaria que une el piso del cráter con la superficie del terreno, en la dirección de máxima pendiente de la pared del cráter, se denomina ángulo de ruptura, ángulo de quiebre o ángulo de desplome.
- Zona de influencia: Correspondiente a la zona adyacente al cráter donde el terreno "siente" en forma "notoria" el efecto de la subsidencia. No hay una definición estandarizada para delimitar esta zona por lo que la extensión de la misma puede ser un poco arbitraria, dependiendo de si existe o no infraestructura que pueda ser afectada y la tolerancia de la misma respecto a las deformaciones diferenciales del terreno. Muchas veces esta zona se denomina zona de agrietamiento, y la inclinación respecto a la horizontal de una línea imaginaria que une el piso del cráter con el límite de esta zona de influencia en superficie se denomina ángulo agrietamiento.

Desde el punto de vista del negocio minero resulta conveniente predecir lo más precisamente posible la evolución de la subsidencia en el tiempo, de modo de poder optimizar el traslado de infraestructura que pudiera ser afectada por ésta, en superficie. Para esto se debe tener en cuenta todos los efectos que pueden afectar la evolución de la subsidencia.

3.2.1. Efecto de la topografía

Como muchas veces la minería se desarrolla en sectores de topografía de montaña, la forma del cráter de subsidencia también se ve afectada por la topografía, ya que se tendrán distintas alturas de columna de roca sobre el Nivel de Socavación.

A igualdad de otras condiciones, en los sectores de mayor altura la pared del cráter será más tendida, mientras que en los sectores de menor altura la pared del cráter será más empinada.

Por otra parte, en los sectores de mayor altura existirá una eventual ocurrencia de inestabilidades en las paredes del cráter, probablemente afectará mayores volúmenes de material, por lo que el crecimiento del perímetro del cráter tenderá a producirse en "incrementos mayores".

También se produce una diferencia importante en las escorrentías de superficie o flujos causados por las aguas lluvias en la superficie del terreno, ya que en los sectores de mayor altura éstas serán impulsadas hacia el interior del cráter, mientras que en los sectores de menor altura éstas no necesariamente escurrirán hacia el cráter.

3.2.2. Efecto de la geología

La geología también afecta en forma importante el desarrollo del cráter, pudiendo señalarse los siguientes efectos principales:

- La roca primaria define paredes más empinadas en el cráter que la roca secundaria, y esta última define paredes más empinadas que los materiales tipo talus o de cobertura.
- La presencia de cuerpos litológicos masivos tiende a definir paredes más empinadas que las correspondientes a macizos rocosos fracturados.
- La presencia de sistemas estructurales y/o estructuras mayores de manteo empinado a subvertical tiende a definir paredes empinadas y con rumbo similar al de las estructuras, sin embargo, este efecto debe evaluarse cuidadosamente debido a que una morfología similar puede resultar de un sector productivo con un límite recto y una topografía de superficie relativamente plana.

3.2.3. Morfología de un cráter de subsidencia

3.2.3.1. Morfología vista en planta

Se divide en 3 formas que son dependientes de los efectos presentados anteriormente:

- a) Forma tipo circular: Caracterizada por conformar una depresión totalmente encerrada por el perímetro del cráter, de modo tal que una línea cualquiera entre dos puntos A y A' en el interior del cráter queda totalmente comprendida dentro de éste, como se ilustra en el esquema (a) de la Figura 3.2.1.
- b) Forma tipo herradura: Caracterizada por conformar una depresión encerrada por el perímetro del cráter pero penetrada por una "lengua" de terreno no hundido, de modo tal que es posible encontrar una línea entre dos puntos A y A' en el interior del cráter que no queda totalmente comprendida dentro de éste, como se ilustra en el esquema (b) de la Figura 3.2.1.
- c) Forma tipo rosquilla: Caracterizada por conformar una depresión totalmente encerrada por el perímetro del cráter pero que presenta una "protuberancia" de terreno no hundido, de modo tal que es posible encontrar una línea entre dos puntos A y A' en el interior del cráter que no queda totalmente comprendida dentro de éste, como se ilustra en el esquema (c) de la Figura 3.2.1.



Figura 3.2.1: Posibles morfologías en planta de un cráter de subsidencia asociado a minería masiva por métodos de hundimiento : (a) forma tipo circular, (b) forma tipo herradura, (c) forma tipo rosquilla. Fuente: (Karzulovic, 1999).

En (b) y (c) (3.2.1) es posible encontrar dos puntos A y A' en el interior del cráter tales que la línea que los une no queda totalmente dentro del cráter.

Dependiendo de la evolución de la minería es posible que desde una forma inicial el cráter evolucione a otra forma (e.g. un cráter tipo herradura puede evolucionar fácilmente a un cráter tipo rosquilla).

3.2.3.2. Morfología con vista en una sección vertical

Tanto en planta como en una sección vertical un cráter de subsidencia presenta dos características fundamentales o que definen el efecto de la subsidencia: su perímetro, definido por las paredes del cráter, y su zona de influencia, correspondiente a la zona donde el terreno "siente" el efecto del cráter.

Conforme con esto si se puede definir el perímetro y la zona de influencia de un cráter de subsidencia asociado a una cierta secuencia minera, entonces el efecto de la subsidencia queda establecido y la planificación minera puede tomarlo en cuenta.

Para este propósito resulta necesario definir la terminología que se utilizará para describir la morfología del cráter de subsidencia. Así, usando como referencia la siguiente figura:



Figura 3.2.2: Esquema ilustrativo de los parámetros utilizados para describir la morfología de un cráter de subsidencia. Fuente: (Karzulovic, 1999).

Se definen los siguientes términos:

- Ángulo de desplome: Pese a que la inclinación de la pared del cráter es variable con la altura respecto a su base, z, por simplicidad es frecuente definir solo la inclinación media de la pared del cráter, la cual queda definida por la línea imaginaria que une el borde del piso del cráter con el coronamiento o cresta de su pared. El ángulo que esta línea forma con la horizontal se denomina ángulo de desplome³, α.
- Ángulo de influencia: El efecto del cráter se extiende más allá de su pared, ya que el macizo rocoso inmediatamente adyacente tiende a desplazarse al interior del cráter y sufre agrietamientos, dislocaciones y deformaciones. Si bien el ancho de esta zona afectada puede variar con la altura respecto al piso del cráter, se define como ángulo de influencia, β, al ángulo respecto a la horizontal de una línea imaginaria que une el borde del piso del cráter con el término de la zona de influencia del cráter en superficie.
- Zona de influencia: Es la zona donde el macizo rocoso se ve afectado por la presencia del cráter de subsidencia.
- Ancho de la zona de influencia: Es el ancho que tiene la zona de influencia, y se denota t_i. Puede variar con la altura z respecto al piso del cráter y, también, a lo largo de su perímetro. Bajo la superficie la forma más usual de determinar el ancho de la zona de influencia es observar la condición de aquellas labores que se ubican a mayor cota que el piso del cráter y, al mismo tiempo, suficientemente cerca de la pared del cráter como para ser afectadas por éste.
- Ancho basal del cráter: Es el ancho de la base o piso del cráter en la sección considerada, y se denota A_B. Puede variar con la orientación de la sección considerada.
- Ancho perimetral del cráter: Es el ancho del perímetro del cráter en superficie, en la sección considerada, y se denota A_S. Puede variar con la orientación de la sección considerada.
- Altura de la pared del cráter: Es la altura desde el piso del cráter hasta el perímetro del cráter en superficie, en la pared considerada, y se denota
 H. Puede variar con la orientación de la sección considerada y, al mismo

³También se denomina ángulo de ruptura o de quiebre

tiempo, ser diferente en las paredes opuestas de una misma sección vertical.

- Columna de material quebrado: Es la altura media de la columna de material quebrado que rellena parcialmente el cráter y sirve de apoyo a sus paredes, y se denota h. Si el ancho basal del cráter en la sección considerada no es muy grande, puede suponerse que h es la misma para las 2 paredes de dicha sección.
- Distancia a la zona agrietada: Es la distancia horizontal desde el borde del piso del cráter al centro de la zona agrietada que usualmente se produce en superficie, en la vecindad inmediata del perímetro del cráter. Se denota D_C y varia a lo largo del perímetro del cráter.
- Ancho de la zona agrietada: Es el ancho horizontal de la zona agrietada en la pared y sección del cráter considerada. Se denota t_C y varia a lo largo del perímetro del cráter.

Capítulo 4

Sistemas de monitoreo

4.1. Monitoreo satelital inSAR

El sistema de monitoreo satelital radar utiliza metodologías avanzadas basadas en la interferometría de permanent scatterers (PSI). La finalidad de este método es poder monitorear los movimientos del terreno como cráteres de subsidencia provocados por minería subterránea y en el control de las inestabilidades del terreno como deslizamientos de laderas naturales y rajos. En comparación con las técnicas convencionales de monitoreo, los métodos basados en PSI proporcionan una mayor resolución y cobertura espacial de medidas a un precio menor, especialmente para cubrir grandes extensiones de terreno y zonas de difícil o peligroso acceso. Además, estas técnicas radar permiten monitorizar grandes áreas de terreno, sin necesidad de instalar instrumentación ni desplegar personal en la zona.

Las mediciones InSAR permiten la evaluación en el mediano y largo plazo (mes/año) tanto del conocimiento que está disponible para los mecanismos de subsidencia, como para la efectividad de las medidas del control de riesgos.

La interferometría SAR (InSAR) es una de las principales aplicaciones de las imágenes radar ya que explota por completo la precisión geométrica de los sistemas SAR (de acuerdo con la longitud de onda del sensor, pocos milímetros). Estas imágenes radar satelitales, al contrario de las imágenes ópticas, proporcionan una medida precisa de la distancia entre el satélite y el terreno. El principio de la interferometría se basa en la superposición de ondas entre dos imágenes con la finalidad de detectar diferencias en la distancia medida en fracciones de longitud

de onda.

Las técnicas aplicadas de procesado de imágenes SAR, permiten obtener medidas de movimiento del terreno, así como ofrecer soluciones de mapeo de cambios de la superficie del terreno, o identificación de estructuras y rasgos geológicos en base a la información de fase y a la amplitud de onda radar.

Los sistemas SAR solamente tienen sensibilidad de medida en la línea de visión o dirección LOS, que corresponde al vector de incidencia oblicuo desde el sensor satelital y la superficie de la tierra. Es decir, las medidas obtenidas consisten en una proyección del movimiento real del terreno en la línea o vector de medida del satélite o LOS. Debido a la órbita polar (norte-sur) de los satélites SAR, la dirección de visión es hacia el Este y al Oeste para el ascendente y el descendente respectivamente. Debido a la geometría de adquisición oblicua y al hecho de que el sensor SAR en esencia mide distancias, dependiendo de la dirección real del movimiento en el terreno, es posible detectar movimiento como un acercamiento al satélite (signo positivo) o como alejamiento del satélite (signo negativo).

Por otro lado, existen una serie de condiciones o limitaciones para obtener puntos de medida. En aquellas zonas donde se hayan producido cambios bruscos en el terreno como por ejemplo excavaciones, acumulaciones de material o cambio total de la superficie, las técnicas utilizadas no serán capaces de proporcionar puntos de medida fiables, por lo tanto en estas zonas no habrá puntos de medida debido al efecto conocido como decorrelación temporal.

Otra de las limitaciones, junto a los cambios superficiales intensos, es la generada por la interacción entre la geometría oblicua de adquisición radar y el relieve montañoso en la zona de estudio. Debido a este hecho se producen unos efectos llamados distorsiones geométricas. Una de ellas se produce en laderas no orientadas al satélite y de mucha inclinación lo que provoca zonas de sombra, donde no hay visión directa entre el satélite y el terreno, así que no se obtendrán puntos de medida. Por otro lado, en laderas orientadas hacia el satélite se puede producir foreshortening o acortamiento de pendiente que consiste en un muestreo más reducido debido a que el sensor radar recibe rebotes de señal de varias zonas de la ladera al mismo tiempo lo que se traduce en un menor muestreo de la extensión real de ladera. Y por último el llamado efecto layover o inversión de pendiente que se produce en pendientes orientadas al satélite con un ángulo de pendiente superior al ángulo de incidencia y donde se reciben rebotes de señal de las cotas altas de la pendiente antes que las zonas bajas lo que invierte la pendiente en la imagen radar resultante impidiendo obtener puntos de medida en estas zonas.

La principal ventaja de las imágenes radar es que es posible escoger un ángulo de incidencia adecuado en los satélites de última generación en base a la zona de estudio para intentar reducir al máximo estos efectos limitantes y ofrecer cobertura casi total de la zona de estudio.

Una de las características de los análisis de movimiento del terreno empleando datos SAR satelitales, es que es posible realizar estudios retrospectivos o del pasado.



Figura 4.1.1: a) Esquema de geometría de adquisición radar, geometría de vuelo y órbita. b) Proyección de movimiento real en línea de visión del terreno LOS. Efecto de acercamiento y alejamiento respecto al satélite. Fuente: Sánchez et al. (2016).

Las técnicas avanzadas PSI están relacionadas con la detección de desplazamientos del terreno de orden milimétrico y centimétrico causados por actividad minera subterránea y deformaciones lentas en superficie. Estas técnicas de procesado de imágenes radar extraen la información de fase de onda radar obtenida por el sensor SAR en cada píxel de la imagen radar. La información de fase está relacionada con la distancia entre el sensor y la superficie terrestre lo que permite monitorizar las deformaciones ocurridas con el paso del tiempo.

Los puntos que no superan los límites de calidad debido a cambios en la reflectividad, cambios bruscos en la superficie del terreno en el transcurso del periodo de estudio, son eliminados y no se proporcionan medidas sobre ellos.

En la mina Los Bronces se trabaja con una empresa colaboradora, la cual provee 2 informes mensuales con la información de los desplazamientos acumulados en superficie de todo el sector mina, de esa manera se puede tener un control a mediano y largo plazo de las inestabilidades presentes en los taludes y en el cráter de subsidencia (Fuente: Sánchez et al. (2016)).

4.2. Monitoreo con radares

El GB-SAR (Ground Based - SAR) es un sistema de imágenes de teledetección terrestre, el cual consiste en un sensor de radar que emite y recibe un tren de microondas, el funcionamiento de los radares es similar al del monitoreo satelital, ya que como se explicara mas adelante usa la interferométria de apertura sintética (SAR) para la medición de inestabilidades en los taludes.

El GB-SAR se basa en un sistema de radar que mide no sólo la amplitud sino también la fase de la señal de radar recibida. Las mediciones de fase se utilizan para obtener información sobre la deformación y la topografía de la escena medida. La principal aplicación es la monitorización de deformaciones. Además su alta sensibilidad a las pequeñas deformaciones, el largo alcance de sus mediciones (hasta varios kilómetros) y su capacidad de obtención de imágenes, permiten al sistema realizar simultáneamente un gran número de mediciones.

Para cada píxel de la imagen obtenida en las mediciones, se proporciona un número complejo, a partir del cual se pueden obtener la fase de la señal φ y la amplitud A.

La amplitud se utiliza principalmente para interpretar la escena de la imagen y para estudiar las características de dispersión de la zona vigilada, en cambio, la fase sirve para la medición de la deformación o para la generación de modelos digitales de elevación en la zona de estudio. Hay que tener en cuenta que en las observaciones en tierra la medición de la deformación se realiza normalmente utilizando una configuración de línea de base cero, es decir, todas las imágenes se toman desde la misma posición.

Consideremos un escenario de medición de deformaciones, observadas dos veces por un sistema GB-SAR. Tomemos las fases φ_1 y φ_2 de dos píxeles homólogos (es decir, píxeles que corresponden al mismo objetivo) de dos imágenes adquiridas en momentos diferentes:

$$\varphi_1 = \varphi_{geom-1} + \varphi_{scatt-1} = \frac{4\pi R_1}{\lambda} + \varphi_{scatt-1}$$
(4.2.1)

$$\varphi_2 = \varphi_{geom-2} + \varphi_{scatt-2} = \frac{4\pi R_2}{\lambda} + \varphi_{scatt-2} \tag{4.2.2}$$

aquí R_1 y R_2 son las distancias entre el sensor y el objetivo en cada adquisición, φ_{scatt} es el desplazamiento de fase generado durante la interacción entre las microondas y el objetivo, λ es la longitud de onda de la señal emitida, y el factor 4π está relacionado con la trayectoria bidireccional, radar-objetivo-radar. Despreciando los efectos de propagación de la señal, la fase interferométrica $\Delta \varphi_{21}$, que es la principal observación de GB-SAR, viene dada por:

$$\Delta\varphi_{21} = \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{4\pi(R_2 - R_1)}{\lambda} + (\varphi_{scatt-2} - \varphi_{scatt-1})$$
(4.2.3)

Si los componentes de desplazamiento de fase $\varphi_{scatt-2}$ y $\varphi_{scatt-1}$ permanecen constantes entre las dos adquisiciones (es decir, su variación en el tiempo es insignificante), $\Delta \varphi_{21}$ estaría directamente relacionado con la diferencia de distancia $(R_2 - R_1)$ y, por tanto, con el desplazamiento del objetivo. En la práctica, hay al menos otros cuatro términos:

$$\Delta \varphi_{21} = \varphi_{scatt-2} - \varphi_{scatt-1} \tag{4.2.4}$$

$$=\varphi_{defo} + (\varphi_{atmo2} - \varphi_{atmo1}) + \varphi_{geom} + \varphi_{noise} + 2 \cdot k \cdot \pi$$

$$(4.2.5)$$

donde φ_{defo} es la componente relacionada con el desplazamiento, ($\varphi_{atmo2} - \varphi_{atmo1}$) es la componente de fase debido a los efectos atmosféricos durante la adquisición de la imagen, φ_{geom} contiene la componente de fase geométrica debido a los errores de reposicionamiento entre las dos adquisiciones de la imagen, φ_{noise} es la componente de fase relacionada con el término ($\varphi_{atmo2} - \varphi_{atmo1}$) y otras fuentes de ruido, como el ruido instrumental; por último, el término $2 \cdot k \cdot \pi$ se debe al hecho de que $\Delta \varphi_{21}$ está envuelto, es decir, limitado en el rango $[-\pi, \pi]$, donde k es un valor entero. Esta última ecuación es la principal ecuación de observación de GB-SAR para la medición de la deformación. Es similar a la ecuación utilizada para las observaciones de interferometría SAR por satélite, donde el término φ_{geom} corresponde a la componente de fase orbital. Además, como ya se ha mencionado anteriormente, la ecuación no contiene la componente de fase topográfica porque las adquisiciones GBSAR se realizan normalmente utilizando una configuración de línea de base cero (Monserrat et al. (2014)).

En Los Bronces entre los radares que se usan algunos son provenientes de la

empresa IDS GeoRadar, uno es el IBIS-FMT que proporciona una medición muy precisa, en tiempo real y en cualquier condición meteorológica, de los movimientos de los taludes de la mina. Además, tiene la capacidad de detección de inestabilidad de taludes, desde fallos en el subsuelo hasta grandes colapsos, esto gracias a la gran resolución espacial y precisión del mismo. Tiene bajos costos de mantenimiento gracias a las pocas piezas móviles y al limitado consumo de energía (alimentación solar con respaldo diésel). Otras de sus características son:

- Monitorización en tiempo real en grandes distancias (4 [km]) de desplazamientos milimétricos de la pendiente con correcciones atmosféricas.
- Generación de alarmas con niveles definidos por el usuario y múltiples criterios de alarma/área múltiple.
- Resultados totalmente georreferenciados proyectados visualmente en vista de radar o en MDT de alta calidad, exportables a paquetes de planificación minera en 3D.
- Tiempo de escaneo rápido (minutos para un escaneo de resolución completa a larga alcance) y sólidas correcciones atmosféricas automáticas.



Figura 4.2.1: Radar IBIS-FMT.

Otro de los radares empleados es el IBIS-ArcSAR que contiene características mas actualizadas respecto de las mencionadas anteriormente, y además permite un monitoreo 360° lo cual entrega un mayor cobertura con una mayor resolución.



Figura 4.2.2: Radar IBIS-ArcSAR.

El uso de radares en Los Bronces esta guiado por el plan de extracción de las fases, la disponibilidad de ellos (si están en mantención o no) y la condición de las zonas críticas o con riesgos permanentes de caída de roca, como lo son el cráter de subsidencia que requiere monitoreo continuo. Los radares IDS tienen la capacidad de usar la herramienta "TRUE VECTOR" la cual permite con 3 radares poder analizar los vectores de movimiento en zonas altamente críticas y de esa manera identificar la dirección real de desplazamiento de las zonas monitoreadas. El software empleado para el análisis de los datos obtenidos por los radares IDS es el Guardian.

4.3. Teodolitos y el monitoreo de prismas

El teodolito es un instrumento de medición mecánico-óptico que se utiliza para obtener ángulos verticales y horizontales. El teodolito actual es un telescopio montado sobre un trípode con 2 círculos graduados, uno vertical y uno horizontal, con los que se miden los ángulos antes mencionados. Funciona combinando plomadas ópticas, un nivel de burbuja y círculos graduados para encontrar ángulos verticales y horizontales en la topografía. La plomada óptica garantiza que el teodolito se sitúe lo más cerca posible de la vertical sobre el punto de medición. El nivel de burbuja interno garantiza que el aparato esté nivelado hasta el horizonte. Los círculos graduados, uno vertical y otro horizontal, permiten al usuario medir los ángulos.



Figura 4.3.1: Figura referencial de un teodolito.

Las estaciones topográficas en este caso los teodolitos son los instrumentos de medición que se emplean para el monitoreo. Cada una tiene una ubicación fija y conocida en la mina, que puede ser representada gráficamente en el software (Aris-G). Además, incluye un sistema de monitoreo, el cual además permite registrar las lecturas, y ofrece herramientas de análisis básico. Un prisma es un aparato, empleado para la medición en topografía, tiene forma circular y se encuentra constituido por un conjunto de cristales. La función que cumplen dichos cristales es la de proyectar la señal EMD que produce un teodolito electrónico o una estación total. De esta manera, se puede calcular la distancia a la que se encuentra de la estación (teodolito), los ángulos respectivos y otras variables físicas del prisma, como desplazamientos en los distintos ejes.



Figura 4.3.2: Figura referencial de un prisma.

Para la medición de las distancias entre estación y el prisma, es necesario que el instrumento registre las siguientes variables:

 Ángulo vertical: También llamado cenital. Un esquema ilustrativo puede verse en la Figura (4.3.3). La unidad de medida puede ser radianes (interno de la estación), grados centesimales (0-400) o grados sexagesimales (0-360).



Figura 4.3.3: Ángulo vertical o cenital de un prisma (vista en plano vertical).

 Ángulo horizontal: También llamado azimutal. Es el ángulo con respecto al Norte, Figura (4.3.4). La unidad de medida puede ser radianes, grados centesimales o grados sexagesimales. Cabe destacar que todas las estaciones miden este ángulo con respecto a un cero interno, y en el sistema de monitoreo se establece un punto de referencia para poder calcular el valor con respecto al norte.



Figura 4.3.4: Ángulo horizontal o azimutal de un prisma (vista en planta).

Distancia inclinada: Distancia mínima entre la estación y el prisma, Figura (4.3.5). La unidad de medida más comúnmente utilizada es en metros, aunque cada sistema puede tener otras unidades.



Figura 4.3.5: Distancia inclinada entre la estación y el prisma.

Para determinar las coordenadas cartesianas de los prismas, Este (eje X), Norte (eje Y) y Cota o elevación (eje Z) se requiere conocer los ángulos y distancia inclinadas anteriormente descritos, así como las coordenadas de la estación.

En Los Bronces se tiene una gran cantidad de prismas situación en toda la mina para el control topográfico de las distintas fases, estos están monitoreados por teodolitos, los cuales miden las variaciones espaciales de los prismas (sus movimientos en todos los ejes). El software empleado para el análisis de datos de los prismas es el Aris-G.

4.4. Time domain reflectometry (TDR)

El TDR utiliza el principio de aplicar un pulso eléctrico a través de un conductor y examinar el pulso eléctrico reflejado en busca de discontinuidades en el material conductor. Cuando se analiza la polaridad, la amplitud y la frecuencia del pulso reflejado, se obtiene la discontinuidad del daño en el material (Kumar and Villuri (2015)).

Existen numerosas aplicaciones que utilizan el principio del TDR, la aplicación de este método en la estabilidad de taludes es en las mediciones de la deformación del macizo rocoso. El TDR se utiliza para controlar los daños causados por la inestabilidad de los taludes en la minería. Para la monitorización de los fallos de los taludes, se realiza un agujero en el talud y se entierra un cable coaxial en él. El análisis de las señales reflejadas por el cable coaxial ayuda a determinar la deformación del macizo rocoso. Los cables coaxiales tienen varias ventajas en comparación con los inclinómetros que miden los desplazamientos laterales del macizo rocoso. Algunas de las ventajas de los cables coaxiales en comparación con los inclinómetros convencionales son:

- Bajo costo de instalación.
- Mayor profundidad de los agujeros.
- Monitoreo mas rápido y de forma remota.
- Determinación casi inmediata de la deformación.

Cuando se excavan aberturas en un macizo rocoso o en el suelo, los esfuerzos pueden superar la resistencia in situ, lo que provoca desplazamientos a medida que los bloques inestables se mueven. Los cables coaxiales como se mencionó anteriormente se entierran en el macizo rocoso a través de pozos, como se muestra en la Figura 4.4.1, para controlar estos desplazamientos. Antes de la instalación, el cable se engarza para proporcionar reflexiones de referencia en lugares físicos conocidos a lo largo del cable. Una vez engarzado, el cable se baja por un pozo y se adhiere a la roca circundante con una lechada de cemento que se introduce en el pozo. En los lugares en los que el movimiento progresivo de la roca es suficiente para fracturar la lechada, se produce una deformación del cable que puede medirse mediante un computador que analiza la situación de los cables (Dowding et al. (1988)).



Figura 4.4.1: Esquema que ilustra la composición de un sistema de monitoreo con TDR. Modificado de: O'Connor and Murphy (1997).

De manera simple se puede decir que el TDR permite medir los cortes de cable en los pozos de manera de poder determinar las zonas de falla del macizo rocoso. Hay que tener en cuenta que los cortes y la conexión del cable con otros medios como por ejemplo el agua puede generar ruido en la señal medida y tener lecturas erróneas. Al igual que para los prismas, los datos entregados por los TDR se analizan en el software Aris-G.

4.5. Sensores Geo4sight

Es un sistema inalámbrico de monitoreo del subsuelo que permite a las empresas mineras evaluar de forma proactiva los riesgos de estabilidad del terreno. Esta tecnología permite monitorear áreas de difícil acceso y donde existe un riesgo critico de estabilidad del macizo rocoso. Ver Figura (4.5.1).

Estos sensores o marcadores toman mediciones en 4 componentes, las 3 primeras corresponden a la posición del sensor y la última componente mide la rotación del mismo respecto a su propio eje.



Figura 4.5.1: Esquema de la disposición de los sensores o marcadores en un pozo para el monitoreo del macizo rocoso en un borde cráter.

Los sensores se introducen en un pozo separados por una distancia equitativa y conectados de manera inalámbrica entre ellos, esto último permite que siempre se tenga información del subsuelo gracias a la comunicación que existente entre sensores vecinos, además, esto provee una ventaja por sobre los TDR ya que permite tener un control completo del pozo.

El software empleado para el análisis de datos es GeoHIVE, el cual permite visualizar los datos en 3D y en gráficos.

4.5.1. RSSI (Received Signal Strength Indicator)

El RSSI (Received Signal Strength Indicator) es una medida que todos los marcadores pueden proporcionar y se puede visualizar en 3 dimensiones. La medición del RSSI se realiza en un marcador en concreto pidiendo a todos los marcadores vecinos que respondan. El marcador original informa de la intensidad de la señal recibida de cada uno de sus marcadores vecinos (las mediciones de RSSI no tienen unidades de medida).

El RSSI puede considerarse del mismo modo que la intensidad de la señal Wi-Fi. Si un computador está cerca del router Wi-Fi tendrá todas las barras de recepción, en cambio más lejos, el computador tendrá menos intensidad de señal. Sin embargo, la intensidad de la señal no es directamente proporcional a la distancia, ya que hay factores adicionales que afectan a la señal. Por ejemplo, si el computador está en un nivel diferente al del router, o si la señal debe viajar a través de paredes de ladrillo, se recibirá una señal más débil.



Figura 4.5.2: Se muestra la visualización de los datos en el software GeoHIVE. Fuente: Manual del GeoHive.

4.5.2. Tilt data

El Tilt Data muestra la cantidad de cambios de inclinación en cada sensor o marcador lo que permite ver que marcadores son los que han presentado más cambios en un periodo de tiempo determinado. Ver Figura (4.5.3).



Figura 4.5.3: Se muestra la visualización de los datos en el software GeoHIVE. Fuente: Manual del GeoHive.

4.5.3. Tilt arrow

El Tilt arrow muestra datos de la dirección de las inclinaciones percibidas por los marcadores, de esta manera se puede caracterizar el comportamiento de los sensores. Ver Figura (4.5.4).



Figura 4.5.4: Flechas de inclinación en la vista 3D. No hay datos de inclinación disponibles para cada segundo Marcador, por lo que se muestran en azul. Fuente: Manual del GeoHive.

4.5.4. Tilt Delta

El gráfico Tilt Delta consta de tres gráficos. El eje x de los tres gráficos corresponde al cambio de inclinación en grados para un marcador, siendo el eje y la distancia desde la parte superior del pozo, en metros. Cada punto de la línea representa un marcador.

El gráfico Sur - Norte describe el cambio de rotación en torno al eje Este - Oeste. El gráfico Oeste - Este describe el cambio de rotación sobre el eje Norte - Sur. Estos movimientos muestran la dirección hacia la que se mueve la nariz del Marcador (4.5.6). El tercer gráfico muestra la inclinación total.



Figura 4.5.5: Gráficos del Tilt delta. Fuente: Manual del GeoHive.



Figura 4.5.6: Vector de orientación del marcador. Fuente: Manual del GeoHive.

4.5.5. Tilt History

El gráfico del Tilt history muestra la DSA (distancia del ángulo subtendido o el largo del arco recorrido por la nariz del marcador) para los marcadores en un pozo durante el período de tiempo seleccionado. El eje x representa el tiempo y el eje Y el valor DSA. Cada línea representa un marcador, con una leyenda en el lado derecho.



Figura 4.5.7: Gráfico del Tilt History. Fuente: Manual del GeoHive.

4.5.6. Tilt Direction

El gráfico Tilt direction es un gráfico polar que muestra la DSA y la dirección de rotación de los marcadores a lo largo del tiempo. La dirección de los puntos en el eje theta refleja el rumbo de rotación, mientras que la distancia desde el centro refleja el largo del DSA.



Figura 4.5.8: Gráfico del Tilt direction. Fuente: Manual del GeoHIVE.

Capítulo 5

Metodología

5.1. Recolección y análisis de la información

Primero se procedió a realizar una lectura bibliográfica de todos los sistemas de monitoreo que contemplo información respecto a su funcionamiento, como también información de los manuales de apoyo de los respectivos softwares utilizados para cada caso. Se hizo una revisión de documentos con información referente al tema estudiado, de manera de poder entender la forma en que se trabaja con la instrumentación geomecánica y como esto ayuda a tener un control de seguridad alto.

También se hicieron visitas a terreno para poder entender el rol que cumple el monitoreo continuo del cráter de subsidencia, y sus implicancias en las fases colindantes. Además, esto permitió conocer los instrumentos usados para el monitoreo.

5.2. Procesamiento de los datos

Para esta memoria se usaron distintos sistemas de monitoreo, debido a esto último se requirió distintas formas de analizar los datos. Para los datos de monitoreo satelital, los prismas y TDR se trabajó con archivos ".CSV", los cuales fueron exportados de los softwares respectivos con excepción del monitoreo satelital donde los datos son descargados de la página de la empresa colaboradora. Los archivos exportados tienen el siguiente formato:

Fecha y hora de adquisición	Nombre instrumento	Dato estudiado
2022-06-01 01:20:17	TDR07	400

Cuadro 5.2.1: Se muestra un tabla referencial de la composición de columnas de los datos trabajados en formato ".CSV". El monitoreo satelital no contiene la columna de "Nombre instrumento".

5.2.1. Monitoreo satelital

A los datos del monitoreo satelital no se le aplico ningún filtro debido a que estos ya fueron corregidos por la empresa colaboradora. Los datos analizados corresponden a información correspondiente a los movimientos del terreno respecto al satélite (en el LOS mencionado en el capítulo (4.1)), estos están en milímetros. Para analizar estos datos primero se seleccionaron zonas representativas o de interés y luego se analizó el comportamiento del grupo de puntos de la zona escogida. Ver la siguiente figura:



Figura 5.2.1: Imagen ilustrativa de la selección de zonas de interés.

El análisis de los datos del monitoreo satelital se hizo desde el 01/01/2020 hasta el 02/05/2022 que es cuando el periodo invernal comienza. Cabe mencionar que en el periodo invernal no se obtienen datos debido a la caída de nieve, la cual genera problemas para la adquisición de datos, esto último genera un "vacío" de



datos entre mayo y septiembre aproximadamente (Ver Figura (5.2.2)).

Figura 5.2.2: La figura muestra la época invernal encerrada en verde.

Una vez seleccionadas las zonas estas se enumeraron y posteriormente se tabularon. Por último, se tomaron en cuenta 2 periodos de tiempo distintos los cuales están determinados por la cantidad de puntos que hay en cada uno, esto debido a que entre un periodo de tiempo y otro hay zonas en las cuales la cantidad de puntos de medida aumentaron y en otros hubo una disminución de ellos (Ver Figura (5.2.3)). El primer periodo de estudio va desde el 01/01/2020 hasta el 24/06/2021, y el segundo periodo va desde el 01/01/2021 hasta el 02/05/2022, los periodos de estudio se solapan durante 7 meses aproximadamente (se busca evitar perder puntos de medición), pero esto no interfiere con el análisis ya que permite encontrar ciertos patrones de movimiento que ocurrieron en el primer periodo y que influyeron en el cambio en la cantidad de puntos de estudio que existen en el segundo. Cabe mencionar que este estudio no se consideró el periodo completo desde el 01/01/2020 hasta el 02/05/2022 debido a que es un periodo largo de tiempo en el cual los cambios topográficos dejan de ser milimétricos por lo tanto no serían registrados (ocurrirá el fenómeno llamado decorrelación temporal mencionado en el capitulo (4.1)).

Para este monitoreo se usó como intervalo de estabilidad el rango de -30 a 30 [mm] de desplazamiento, esto debido a que es un rango razonable de estabilidad y que se puede comprobar en terreno.



Figura 5.2.3: La figura muestra con círculos negros el cambio en la cantidad de puntos entre un periodo y otro. El primer periodo (izquierda) va desde 01/01/2020 hasta el 24/06/2021 y el segundo (derecha) va desde 01/01/2021 hasta el 02/05/2022.

5.2.2. Time domain reflectometry (TDR)

Para los datos de los TDR se eliminaron los datos atípicos, los cuales eran claramente visibles. Estos datos mostraban en ciertos casos un alargamiento exagerado del cable lo cual es imposible,o por el contrario, algunos mostraban un corte de cable que después volvía al largo existente previamente, esto igual es una lectura incorrecta por lo que se procedió a eliminarlos también.



Figura 5.2.4: En la figura se muestran peaks correspondientes a datos atípicos del comportamiento del TDR.

5.2.3. Teodolitos y el monitoreo de prismas

En el caso de los prismas se trabajó primero con datos del módulo del vector de movimiento y luego con datos de su desplazamiento en cota (movimiento vertical). El módulo del vector de movimiento nos va a entregar información respecto a si los prismas se movieron o no en cualquier dirección, y en el caso que hubiera movimientos ver si estos fueron repentinos o continuos en el tiempo. La información obtenida por los datos del movimiento en cota nos permite hacer una distinción entre el tipo de movimiento que sufrió el prisma (en que el caso que se movieran), es decir, si los movimientos fueron mayormente horizontales o verticales. Se hizo un análisis de todos los prismas cercanos a la zona de estudio. El periodo de análisis va desde el 01/01/2021 hasta el 30/06/2022 en el caso que así sea (en algunos casos hubo prismas que dejaron de transmitir información antes de la fecha determinada por trabajos de la misma operación).

Estos datos se filtraron tomando en cuenta un prisma de referencia, el cual está presente en la mina y se encuentra en una zona sin actividad durante el periodo de estudio. El prisma usado fue el D236, a continuación, se muestra su ubicación:



Figura 5.2.5: Ubicación prisma D236 en Operación Los Bronces.

A continuación se muestran los gráficos de los movimientos 3D (Módulo del vector de desplazamiento) y movimientos en cota del prisma de referencia D236:



Figura 5.2.6: Los gráficos muestran el módulo del vector de desplazamiento y el desplazamiento vertical del prisma de referencia D236.

Como se aprecia en los gráficos anteriores este prisma de referencia presenta una estabilidad durante el periodo de estudio, por lo tanto, permite corregir el error de mejor manera. Se trabajo con 3 grupos de prismas los cuales se diferencian por la cantidad de tiempo de monitoreo y si poseen ruido o "saltos" (Ver Figura (5.2.7)).



Figura 5.2.7: En el gráfico se muestra un tipo de ruido por el movimiento de la estación y que se denominó "saltos".

5.2.4. Sensores Geo4sight

Con los sensores Geo4sight se trabajo con 2 pozos, el pozo 3 y el pozo 4 los cuales se ubican en las fases de Infiernillo 5 y 6 respectivamente.



Figura 5.2.8: Ubicación de los pozos de sensores Geo4sight.

La información analizada corresponde al Tilt Delta y al Tilt History (Ver capítulo (4.5)) para ambos pozos, se usaron periodos de tiempo distintos que se relaciona con las fechas de instalación de ambos pozos. Para el pozo número 3 se usaron datos que van desde el 04/02/2022 hasta el 20/08/2022 y para el pozo número 4 se usaron datos que van desde el 22/07/2021 hasta el 23/08/2022.

Para analizar estos datos se hizo una comparación en el comportamiento de ambos pozos de manera de poder ver como el medio que los rodea los afecta, además se buscaron tendencias anómalas que pudieran mostrar la ocurrencia de algún evento geomecánico.

5.2.5. Monitoreo con radares

Para los datos obtenidos por el monitoreo de radares se trabajó con proyectos, los cuales son el almacenamiento de información del monitoreo en tiempo real de la mina. Los proyectos permiten revisar información histórica del comportamiento de la mina y evaluar distintos eventos geomecánicos que hayan ocurrido. El cambio de un proyecto a otro está definido por la situación actual de cada radar, o sea si el radar está en funcionamiento o no (mantención, fallo de medición, etc..).

Para trabajar con los distintos proyectos se seleccionaron áreas y puntos de interés en distintos sectores del cráter de subsidencia (Ver Figura (5.2.9).



Figura 5.2.9: En la imagen se aprecia un área y un punto seleccionado.

Luego de hacer la selección de áreas y puntos se procedió a graficar los desplazamientos que estos tuvieron durante el periodo de información que contiene el proyecto¹. Además, los proyectos analizados se dividieron por zonas de monitoreo, es decir, se van a tener 2 grupos de proyectos. El primer grupo de proyectos va a contener información del monitoreo de las fases de Infiernillo 5 y 6 que corresponde a la zona sur del cráter, y para el segundo grupo de proyectos se va a tener información del monitoreo hacia la fase de Donoso 2 que corresponde a la zona norte del cráter (Ver Figura (5.2.10)).

¹Los periodos de estudio varían entre cada proyecto dependiendo de la cantidad de tiempo que alcanzo a monitorear cada radar antes de un mantenimiento o fallo.


(a) Ubicación del radar con vista hacia la fase de Donoso 2.



(b) Ubicación del radar con vista hacia las fases de Infiernillo 5 y 6.



Cabe mencionar que los datos de los desplazamientos recopilados por los radares son respecto al mismo radar, es decir, un acercamiento o alejamiento indica el movimiento de un punto en la línea recta que une al radar y al mismo punto de medición. Para desplazamientos negativos vamos a tener acercamiento al radar y para los positivos un alejamiento. Para los proyectos que tienen información de las fases de Infiernillo 5 y 6, se trabajó con 2 proyectos que contienen en conjunto datos desde el 10/06/2021 hasta el 13/05/2022. Para el caso de los proyectos que tienen información de la fase de Donoso 2 se trabajó con 3 proyectos que contienen en conjunto datos desde el 13/01/2022 hasta el 22/06/2022; Para los proyectos de Donoso 2 se tiene que entre el 11/05/2022 hasta el 26/05/2022 no hay datos, esto debido a que no se reproceso el proyecto correspondiente por la complejidad del reprocesado y problemas de tiempo.

Capítulo 6

Resultados

En este capitulo se presentaran todos los resultados para cada monitoreo en particular.

6.1. Monitoreo satelital

Para los 2 periodos de estudio contenidos en el monitoreo satelital, se tienen 9 zonas seleccionadas, las cuales no son las mismas para los 2 periodos. Los puntos de movimiento mostrados en las Figuras (6.1.2) y (6.1.3) se leen con la escala de la siguiente Figura (6.1.1):

VELOCIDAD MEDIA ANUAL				
Alejamiento*			1	Acercamiento*
<-100	-50	0	50	>100
[mm/año] *respecto al satélite, en línea de visión satelital (descendente)				

Figura 6.1.1: Escala de la velocidad media anual para las figuras (6.1.2) y (6.1.3).

Se presentan las primeras 9 zonas de interés seleccionadas que se encuentran alrededor del cráter de subsidencia correspondientes al periodo 01/01/2020 hasta el 24/06/2021:



Figura 6.1.2: Zonas de interés seleccionadas alrededor del cráter de subsidencia para el periodo 01/01/2020 hasta el 24/06/2021.

En la siguiente tabla se presentan los resultados de las zonas seleccionadas para el primer periodo de estudio, estas características comprenden el desplazamiento acumulado del conglomerado de puntos¹ seleccionado y la velocidad media anual alcanzada para el mismo conglomerado de puntos:

	Zona	Desplazamiento acumulado final	Velocidad media
1	Zona norte del cráter de subsidencia	-64,0 [mm]	-45.6 [mm/año]
2	Ladera noreste del cráter de subsidencia	-14.8 [mm]	-10.7 $[mm/año]$
3	Zona noroeste del cráter de subsidencia	-7.1 [mm]	-7.5 [mm/año]
4	Zona Infiernillo inferior	10.3 [mm]	$6.6 \ [mm/año]$
5	Zona interior del cráter de subsidencia	4.1 [mm]	$2.6 \ [mm/año]$
6	Zona Infiernillo superior	-35.9 [mm]	$-23.1 \ [mm/año]$
7	Zona sur 1	-182.3 [mm]	-113.8 [mm/año]
8	Zona sur 2	-233.7 [mm]	-146.5 [mm/año]
9	Zona sur 3	-295.2 [mm]	-188.7 [mm/año]

Cuadro 6.1.1: En la tabla se muestran los resultados para cada zona. Los números de la primera columna se relacionan con los números de las zonas de la Figura (6.1.2).

Los resultados muestran estabilidad para las zonas número 2, 3, 4 y 5, las cuales estaban más cercanas a las fases operativas durante ese periodo de tiempo. La zona número 1 muestra subsidencia, pero esto se relaciona con los trabajos de la Operación Los Bronces en el lugar. La zona número 6 muestra subsidencia en el lugar, lo cual es un indicio del comienzo del hundimiento. Las zonas número 7, 8 y 9 muestran una subsidencia más notoria durante el periodo de estudio alcanzando valores centimétricos.

¹Los conglomerados de puntos son los que componen las distintas zonas de interés seleccionadas.

A continuación se presentan las 9 zonas de interés seleccionadas que se encuentran alrededor del cráter de subsidencia correspondientes al periodo 01/01/2021 hasta el 02/05/2022:



Figura 6.1.3: Zonas de interés seleccionadas alrededor del cráter de subsidencia para el periodo 01/01/2021 hasta el 02/05/2022.

La Figura (6.1.3) a diferencia de la Figura (6.1.2) muestra una mayor cantidad de puntos de medición, esto se debe a que para el segundo periodo de estudio los movimientos se encuentran adentro del rango de medición (movimientos milimétricos), con esto último se infiere que la mina alcanzo una mayor estabilidad en algunas zonas, pero por el contrario también aparecieron zonas en las cuales ya no hay puntos de medición, lo cual es un indicio del aumento en las magnitudes de movimiento de aquellos lugares.

	Zona	Desplazamiento acumulado final	Velocidad media anual
1	Zona noroeste del cráter de subsidencia segundo periodo	-19.9 [mm]	-14.8 [mm/año]
2	Ladera noreste del cráter de subsidencia segundo periodo	-9.9 [mm]	-7 [mm/año]
3	Zona oeste del cráter de subsidencia	6.2 [mm]	4.7 [mm/año]
4	Zona oeste del cráter de subsidencia más al sur	9.9 [mm]	7.8 [mm/año]
5	Zona oeste al interior del cráter de subsidencia segundo periodo	27.7 [mm]	$20.1 \ [\mathrm{mm/año}]$
6	Zona sur 1 segundo periodo	-170.9 [mm]	-125.5 [mm/año]
7	Zona sur 2 segundo periodo	-139.7 [mm]	-102.4 [mm/año]
8	Zona sur 3 segundo periodo	-44.5 [mm]	-33.8 [mm/año]
9	Zona sur 4 segundo periodo	-187.0[mm]	-132.4 [mm/año]

En la siguiente tabla se presentan los resultados de las zonas seleccionadas para el segundo periodo de estudio:

Cuadro 6.1.2: En la tabla se muestran los resultados para cada zona. Los números de la primera columna se relacionan con los números de las zonas de la Figura (6.1.3).

Los resultados muestran estabilidad en las zonas número 1, 2, 3, 4 y 5. La zona número 5 a pesar de estar dentro del rango de estabilidad, muestra asentamiento que puede corresponden al colapso de material hacia el interior del cráter. Las zonas 6, 7, 8 y 9 muestran una subsidencia notoria. De los resultados de este último periodo de estudio se deduce que el cráter de subsidencia está avanzando hacia el sureste. Las zonas número 6, 7, 8 y 9 del primer periodo de estudio (Ver Figura 6.1.2) desaparecieron, esto debido a que ya no se encuentran en un rango medible por lo tanto la actividad en esas zonas ahora es mayor.

Los gráficos de los desplazamientos acumulados para el primer periodo de estudio se encuentran en el apéndice (A1) y en el apéndice (A2) para los gráficos del segundo periodo.

6.2. Monitoreo con radares

6.2.1. Monitoreo hacia las fases Infiernillo 5 y 6

6.2.1.1. Primer proyecto

El primer proyecto usado tiene información desde el 10/06/2021 hasta el 13/04/2022, en él se seleccionaron 7 áreas y 15 puntos de interés. A continuación se muestran las primeras 4 áreas seleccionadas para el primer proyecto:



Figura 6.2.1: La figura muestra 4 áreas seleccionas para el primer proyecto.

Las 4 primeras áreas seleccionadas representan la zona del bloque activo y las zonas que lo rodean, este bloque se encuentra en constante movimiento y su monitoreo es prioritario. A continuación se muestra el gráfico de desplazamiento de las áreas seleccionadas de la figura anterior:



Figura 6.2.2: El gráfico muestra los desplazamiento en milímetros de las 4 áreas seleccionadas.

Se observa que el bloque activo se desplaza de forma continua, en cambio existe estabilidad en todas las áreas que lo rodean (Infiernillo alto, medio y bajo).

A continuación se muestran las 3 áreas restantes que corresponden a la división del Bloque activo BC^2 :



Figura 6.2.3: La figura muestra 3 zonas seleccionadas sobre el bloque activo.

A continuación se muestran el gráfico de desplazamiento de las áreas del bloque activo de la figura anterior:



Figura 6.2.4: El gráfico muestra los desplazamientos en milímetros de las 3 áreas seleccionadas.

Se observa que las 3 áreas se mueven con velocidades distintas, siendo la Mitad bloque BC la que más se mueve y Base bloque BC la que menos lo hace. También se observa que en noviembre del 2021 existe un cambio en las tendencias de movimiento, mostrando que la Base bloque BC se estabilizo. Esto último se puede asociar al colapso de material hacia el interior del cráter, reduciendo los desplazamientos en la zona.

A continuación se muestran los 15 puntos seleccionados:



Figura 6.2.5: La figura muestra 15 puntos seleccionados en toda la zona monitoreada.



A continuación se muestra el gráfico de desplazamiento de los puntos seleccionados de la figura anterior:

Figura 6.2.6: Desplazamientos en milimetros de los 15 puntos seleccionados

Se observa que los puntos 1, 4, 5, 7 y 8 fueron los que tuvieron un mayor movimiento. Estos puntos son los que se encuentran adentro de la zona del Bloque activo BC. El punto 12 también muestra desplazamientos pero estos se relacionan con un cono de relleno existente en el lugar. Todos los demás puntos presentan estabilidad.

6.2.1.2. Segundo proyecto

El segundo proyecto contiene información desde el 13/04/2022 hasta el 05/05/2022. Para este proyecto se seleccionó la misma cantidad de áreas y de puntos. A continuación, se muestran las 4 áreas seleccionadas:



Figura 6.2.7: La figura muestra 4 áreas seleccionadas para el segundo proyecto.



A continuación, se muestra el gráfico de desplazamiento de las 4 áreas seleccionadas:

Figura 6.2.8: El gráfico muestra los desplazamientos en milímetros de las 4 áreas seleccionadas.

Se observa que el Bloque activo BC tiene un movimiento continuo con una tendencia clara, en cambio todas las áreas que lo rodean están estables.

A continuación se muestran las áreas del bloque activo BC:



Figura 6.2.9: La figura muestra 3 zonas seleccionadas del bloque activo.

A continuación, se muestra el grafico de desplazamiento de las áreas del bloque activo:



Desplazamientos de las áreas del bloque activo

Figura 6.2.10: El gráfico muestra los desplazamientos en milímetros de las 3 áreas seleccionadas.

Se observa que las tendencias de movimiento continúan al igual que en el primer

proyecto. La Base bloque BC continua con la estabilidad vista en el proyecto anterior.



A continuación se muestran los 15 puntos seleccionados:

Figura 6.2.11: La figura muestra los 15 puntos seleccionados.

A continuación se muestra el gráfico de los desplazamiento de los 15 puntos:



Desplazamientos de los puntos seleccionados

Figura 6.2.12: El gráfico muestra los desplazamientos de los 15 puntos seleccionados.

Se observa que los puntos 1, 4, 5, 7 y 8 son los puntos con mayores desplazamientos, los cuales se encuentran en la zona del Bloque activo BC. Todos los otros puntos están estables.

En términos generales los resultados muestran que el Bloque activo BC esta en constante movimiento y se puede identificar claramente, esto debido a que las zonas que lo rodean se encuentran bastante estables y no se observa que el bloque activo arrastre a las zonas colindantes.

6.2.2. Monitoreo hacia la fase Donoso 2

6.2.2.1. Primer proyecto

El primer proyecto usado tiene información desde el 13/01/2022 hasta el 15/02/2022, en el se seleccionaron 5 áreas y 15 puntos de interés. A continuación, se muestran las 5 áreas seleccionadas:



Figura 6.2.13: La figura muestra las 5 áreas seleccionadas.

A continuación, se muestra el gráfico de desplazamiento de las áreas anteriores:



Figura 6.2.14: El gráfico muestra los desplazamientos de las 5 áreas seleccionadas.

El gráfico muestra 3 áreas con desplazamientos (Donoso 1, Donoso 2 y Base Donoso), estas zonas se encuentran al interior del cráter y se relacionan a trabajos de la Operación Los Bronces. Las demás zonas se muestran estabilidad.



A continuación, se muestran los 15 puntos seleccionados:

Figura 6.2.15: La figura muestra los puntos seleccionados desde el 1 al 6.



Figura 6.2.16: La figura muestra los puntos seleccionados desde el 7 al 9.



Figura 6.2.17: La figura muestra los puntos seleccionados desde el 10 al 15.

A continuación, se muestra el gráfico de desplazamiento de los 15 puntos seleccionados:



Figura 6.2.18: El gráfico muestra los desplazamiento de los 15 puntos seleccionados.

El gráfico muestra que los mayores desplazamientos se encuentran en los primeros 6 puntos los cuales se relacionan con los trabajos llevados a cabo por la Operación Los Bronces. Los demás puntos muestran estabilidad.

6.2.2.2. Segundo proyecto

El segundo proyecto usado tiene información desde el 15/02/2022 hasta el 11/05/2022, se seleccionó la misma cantidad de áreas y de puntos que en el proyecto anterior. A continuación se muestran las áreas seleccionadas:



Figura 6.2.19: La figura muestra las 5 áreas seleccionadas.

A continuación, se muestran los desplazamientos las áreas anteriores:



Figura 6.2.20: Desplazamientos de las áreas generales seleccionadas.

El gráfico muestra 3 áreas con desplazamientos (Donoso 1, Donoso 2 y Base Donoso), estas zonas se encuentran al interior del cráter y se relacionan a trabajos de la Operación Los Bronces. Las demás zonas se muestran estabilidad.



A continuación, se muestran los 15 puntos seleccionados:

Figura 6.2.21: La figura muestra los puntos seleccionados desde el 1 al 6.



Figura 6.2.22: La figura muestra los puntos seleccionados desde el 7 al 9.



Figura 6.2.23: La figura muestra los puntos seleccionados desde el 10 al 15.

A continuación, se muestra el gráfico de desplazamiento de los 15 puntos seleccionados:



Figura 6.2.24: El gráfico muestra los desplazamientos de los 15 puntos seleccionados.

El gráfico muestra que los mayores desplazamientos se encuentran en los primeros 6 puntos los cuales se relacionan con los trabajos llevados a cabo por la Operación Los Bronces. Los demás puntos muestran estabilidad.

6.2.2.3. Tercer proyecto

El tercer proyecto usado tiene información desde el 26/05/2022 hasta el 22/06/2022, se seleccionó la misma cantidad de áreas y puntos que en los proyectos anteriores. A continuación, se muestran las áreas generales seleccionadas:



Figura 6.2.25: La figura muestra las 5 áreas seleccionadas.

A continuación, se muestra el gráfico de desplazamiento con las 5 áreas seleccionadas:



Figura 6.2.26: Desplazamientos de las 5 áreas generales.

El gráfico muestra que al inicio de junio existió un alejamiento de material hacia el radar, esto se relaciona con la caída de nieve durante el periodo invernal. Las áreas de Donoso 1, Donoso 2 y Base Donoso presentan la misma tendencia de movimiento que en los proyectos anteriores. El área de Ladera Donoso se ve estable y no se ve afectada por la caída de nieve esto debido a su verticalidad que le impide la acumulación de material. El área Exterior cráter Donoso muestra estabilidad sin tomar en cuenta el desplazamiento producido por la caída de nieve. A continuación, se muestran los 15 puntos seleccionados:



Figura 6.2.27: La figura muestra los puntos seleccionados desde el 1 al 6.



Figura 6.2.28: La figura muestra los puntos seleccionados desde el 7 al 9.



Figura 6.2.29: La figura muestra los puntos seleccionados desde el 10 al 15

A continuación, se muestra el gráfico de desplazamiento de los 15 puntos seleccionados:



Figura 6.2.30: Desplazamientos de los 15 puntos seleccionados.

El gráfico muestra la acumulación de nieve mencionada anteriormente. Los primeros 6 puntos son los que muestran desplazamiento pero se siguen relacionando a los trabajos de la operación, y los demás puntos se muestran estables.

6.3. Resultado del monitoreo con teodolitos y los prismas

Se trabajo con 3 grupos de prismas, los cuales se clasificaron por su periodo de estudio y el ruido que presentan. A continuación se muestra una tabla que explica los 3 grupos:

	Periodo de tiempo	Presenta ruido
Grupo 1	01/01/2021 hasta el $30/06/2022$	No
Grupo 2	01/01/2021 hasta el $30/06/2022$	Si
Grupo 3	01/01/2021 hasta el $05/05/2021$	Si

Cuadro 6.3.1: La tabla muestra los 3 grupos de prismas estudiados.

A continuación se muestran las ubicaciones del primer grupo de prismas:



Figura 6.3.1: La figura muestra la ubicación del primer grupo de prismas.

Estos prismas como se aprecia en la imagen se encuentran cercanos a la fase de Donoso 2. A continuación se presentan los gráficos correspondientes al modulo del vector de desplazamiento, y al desplazamiento en el eje vertical:



(b) Desplazamiento en el eje vertical.

Figura 6.3.2: Los gráficos muestran el módulo del vector de desplazamiento, el desplazamiento en el eje vertical respectivamente para el primer grupo de prismas.

El gráfico para el módulo del vector de desplazamiento muestra estabilidad para todo el grupo de prismas, a excepción del prisma D386 que muestra un movimiento de 0.5 [m] en todo el periodo de estudio. El movimiento presentado por el prisma D386 se puede relacionar con ruido de monitoreo, al ver la tendencia con la que se desplaza verticalmente y al compararlo con el grupo de prismas con el que se encuentra.



A continuación, se muestra la ubicación del segundo grupo de prismas:

Figura 6.3.3: La figura muestra la ubicación del segundo grupo de prismas.

Este grupo de prismas tiene información durante todo el periodo de estudio pero a diferencia del grupo anterior posee ruido. El ruido presente se ve como saltos (ver capitulo (5.2.3)). Estos prismas como se aprecia en la imagen se encuentran cercanos a la fase de Donoso 2. A continuación se presentan los gráficos correspondientes al módulo del vector de desplazamiento, y al desplazamiento en el eje vertical:



(a) Módulo del vector de desplazamiento.



(b) Desplazamiento en el eje vertical.

Figura 6.3.4: Los gráficos muestran el módulo del vector de desplazamiento, el desplazamiento en el eje vertical respectivamente para el segundo grupo de prismas.

El gráfico del módulo del vector de desplazamiento muestra ruido por saltos durante el inicio del 2021 y al inicio del 2022, por otro lado podemos ver que los saltos son los mismos para todo el grupo de prismas, por lo tanto al no tomar en cuenta este ruido y revisar las tendencias podemos ver que todos se comportan de la misma manera lo cual nos muestra que se encuentran estables. Si revisamos el gráfico con los desplazamientos verticales podemos ver que igual existe un salto al inicio del 2022 y es el mismo para todo el grupo, si nos enfocamos solo en las tendencias el desplazamiento vertical nos vuelve a mostrar que los prismas se encuentran estables.

A continuación, se muestra la ubicación del tercer grupo de prismas:



Figura 6.3.5: La figura muestra la ubicación del tercer grupo de prismas.

Este grupo de prismas tiene información solo al inicio del 2021 debido a los trabajos llevados a cabo por la Operación Los Bronces que generó la perdida de los mismos. Además este grupo de prismas también presenta ruido por movimiento de estación o teodolito.

Este grupo de prismas tiene información de todas las fases que rodean la cráter de subsidencia. A continuación se presentan los gráficos correspondientes al módulo del vector de desplazamiento, y al desplazamiento en el eje vertical:



Módulo del vector de desplazamiento para todos los prismas

(a) Módulo del vector de desplazamiento.



Figura 6.3.6: Los gráficos muestran el módulo del vector de desplazamiento, el desplazamiento en el eje vertical respectivamente para el tercer grupo de prismas.

El gráfico del módulo del vector de desplazamiento muestra el mismo ruido por movimiento de la estación que el grupo anterior de prismas. Si no se toma en cuenta este ruido se ve que todo el grupo de prismas se encuentra estable y al analizar el gráfico de los desplazamiento verticales también se observa estabilidad. El prisma P361 dejo de entregar información en enero del 2021 y esto es un indicador del avance del cráter hacia el sur.

6.4. Resultado del monitoreo con cables TDR

Se trabajó con 4 cables TDR de los cuales 3 se encuentran en la fase de Infiernillo 5 y el restante en la fase Donoso 2. En la siguiente figura se presentan la ubicaciones de los 4 TDR:



Figura 6.4.1: La figura muestra la ubicación de los 4 TDR analizados.



A continuación, se muestran los gráficos con el comportamiento que los TDR han tenido:

Figura 6.4.2: El gráfico muestra el comportamiento del TDR 07.

El TDR 07 ubicado en Donoso 2 muestra estabilidad durante los primeros 5 meses del 2021, luego de ese periodo de tiempo el TDR no entrego mas información debido a la presencia de ruido (posiblemente por contacto con agua).



Figura 6.4.3: El gráfico muestra el comportamiento del TDR 01

El TDR 01 muestra estabilidad durante todo el periodo de estudio.



Figura 6.4.4: El gráfico muestra el comportamiento del TDR 02.

El TDR 02 muestra estabilidad durante todo el periodo de estudio.



Figura 6.4.5: El gráfico muestra el comportamiento del TDR 09.

El TDR 09 presenta cortes de cable durante los primeros 5 meses del 2021 y luego presenta el último corte de cable en octubre del mismo año. Se corto alrededor de 10 [m] de cable durante el 2021, luego en 2022 el TDR 09 muestra estabilidad.

En términos generales los resultados muestran que los TDR no se han cortado durante el último tiempo en la fase de Infiernillo 5. El TDR 07 dejo de entregar información y no se puede concluir el comportamiento que ha tenido durante los últimos meses.

6.5. Resultados del monitoreo con Sensores Geo4sight

Se tienen 2 pozos con sensores Geo4sight, de los cuales el pozo 3 posee 150 marcadores y el pozo 4 posee 146 marcadores. En la siguiente figura se muestras las posiciones de ambos pozos:



Figura 6.5.1: La figura muestra la ubicación de los pozos 3 y 4.

A continuación se muestran los gráficos del Tilt History para el pozo 3 y luego el pozo 4:



Figura 6.5.2: El gráfico muestra el Tilt History del pozo 3.

El pozo 3 muestra movimientos continuos en el tiempo que no esclarecen ninguna tendencia en particular. Los movimientos mas grandes se encuentran al inicio y al final del pozo y su magnitudes se pueden asociar a tronaduras cercanas. A continuación se muestra una tabla los sensores que mas se movieron:

Marcador	DSA [mm]
148	12.4274
15	11.2227
16	9.74902
150	8.02342
31	7.27555
18	6.68428
143	6.12118

Cuadro 6.5.1: La tabla muestra los 7 marcadores que mas se movieron. Los marcadores se comienzan a contar desde el fondo del pozo (ej: el marcador 1 se encuentra al fondo de todo el pozo).



Figura 6.5.3: El gráfico muestra el Tilt History del pozo 4.

El pozo 4 muestra movimientos continuos en el tiempo, los cuales son bajos y muestran estabilidad a lo largo de todo el perfil. Los movimientos mas relevantes se encuentran en la última mitad del pozo aunque tomando en cuenta las magnitudes de movimiento podemos ver que son semejantes entre si lo cual indica estabilidad. A continuación se muestra una tabla con los marcadores que mas se movieron:

Marcador	DSA [mm]
144	4.26265
50	2.63004
32	2.33194
138	2.23718
104	2.19671
123	2.18769
136	2.11313

Cuadro 6.5.2: La tabla muestra los 7 marcadores que mas se movieron. Los marcadores se comienzan a contar desde el fondo del pozo (ej: el marcador 1 se encuentra al fondo de todo el pozo).



A continuación se muestran los gráficos del Tilt Delta para los pozo 3 y 4:

(a) Tilt Delta del pozo 3. (b) Tilt Delta del pozo 4

Figura 6.5.4: Los gráficos muestran el Tilt Delta de los pozos 3 y 4 respectivamente. Las lineas verde, amarillo y rojo tienen la finalidad de poder diferenciar los movimientos por su magnitud.

Se observa que ambos gráficos se relacionan con los gráficos de Tilt History. El pozo 3 tiene las mayores inclinaciones al inicio y al final del pozo, en cambio el pozo 4 tienen movimientos de similar magnitud en todo el perfil. No se aprecian tendencias que generen alertas.
Capítulo 7

Discusión

En general los distintos sistemas de monitoreo entregaron resultados concretos respecto a la situación del cráter de subsidencia durante los últimos 2 años aproximadamente, esto permite tener una idea clara de cómo se está comportando el cráter.

Para el monitoreo satelital se observa que entre un periodo de estudio y otro tenemos zonas donde la estabilidad aumento y otras donde disminuyo. Estos resultados permiten ver hacia donde está creciendo el cráter, en particular, podemos ver que la zona norte tendió a la estabilización y la zona sur aumento su actividad, de hecho, se aprecia como el cráter está siguiendo el plan de explotación de la mina subterránea. Lo interesante seria poder determinar las magnitudes de crecimiento del cráter para así poder proyectar que tan grande pueda llegar a ser en un futuro. La inclusión de datos de monitoreo satelital con desplazamientos métricos podría permitir ver que está ocurriendo en las zonas donde no se observan puntos de medición. A continuación se muestra una figura que muestra los resultados mas relevantes del monitoreo satelital:



Figura 7.0.1: La figura muestra en verde las zonas estables y con flechas rojas el avance de la subsidencia.

Como se observa en la figura (7.0.1) las zonas que rodean a la fase Donoso 2 están estables junto con la zona cercana a Infiernillo 5. Las flechas rojas indica hacia donde está avanzando la subsidencia a partir del monitoreo satelital.

El monitoreo con radares es por lejos la herramienta más fuerte ya que permite tener un control en tiempo real de lo que ocurre en la zona del cráter de subsidencia y con una buena precisión, además entrega información en áreas grandes permitiendo tener monitoreado el cráter en su totalidad (tomando en cuenta solo las zonas que afectan a la Operación Los Bronces). Los resultados muestran estabilidad en zonas operativas de la mina, y solo muestran una zona activa que sería el bloque activo, pero este se encuentra bien identificado. A continuación se muestra una figura que muestra los resultados mas relevantes del monitoreo con radares:



Figura 7.0.2: La figura muestra en verde las zonas estables y en rojo las donde existe una inestabilidad por subsidencia.

Como se observa en la figura (7.0.2) tenemos 3 áreas grandes que presentan estabilidad (en verde) y una zona roja que corresponde al lugar donde está el bloque activo. La línea segmentada (en amarillo) indica que la distancia entre la zona estable con la inestable es pequeña mostrando que el bloque activo está bien definido como se mencionó anteriormente.

Los resultados entregados por el monitoreo de prismas son buenos y muestran estabilidad durante los periodos de tiempo en los cuales alcanzaron a monitorear, además el ruido generado por el cambio de posición de la estación no fue un problema a la hora del análisis. El monitoreo con los cables TDR tambien entrega resultados bastante buenos, se observa que los TDR 01 y 02 todavia no han sido alcanzados por la subsidencia en el subsuelo a diferencia del TDR 09 que si se vio afectado el 2021 pero que en el 2022 no ha tenido actividad. Un punto importante a tomar en cuenta es la perdida del TDR 07, esto debido a que no tiene mucho tiempo de monitoreo por la presencia de ruido.

Continuando con el monitoreo en el subsuelo, los sensores Geo4sight entregaron resultados que son concluyentes respecto a la situación general de cada pozo al no mostrar tendencias preocupantes. A continuación se muestra una figura que muestra los resultados mas relevantes del monitoreo de prismas, cables TDR y sensores Geo4sight:



Figura 7.0.3: La figura muestra en verde las zonas estables y con nombres en amarillo el monitoreo usado para llegar a ese resultado.

Reuniendo todos los resultados se puede delimitar de buena forma lo que se encuentra estable de lo que no. Tenemos que las fases de Infiernillo 5 y 6 solo se ven afectadas por el bloque activo pero que no muestra un movimiento hacia la Operación Los Bronces, además se observa que el avance del cráter tiene relación directa con la explotación de la mina subterránea. A continuación se muestra una figura que resume los resultados obtenidos por todos los monitoreos vistos en este estudio:



Figura 7.0.4: La figura muestra en verde las zonas estables y en rojo las zonas inestables. Se relacionan los resultados obtenidos por el monitoreo satelital, monitoreo de radares, el monitoreo de prismas, el monitoreo en el subsuelo de los cables TDR y los sensores Geo4sight.

Capítulo 8

Conclusión

- Los resultados permitieron caracterizar la situación del cráter de subsidencia, además la información muestra que las fases que operan al lado del cráter de subsidencia están trabajando en lugares estables y que no se encuentran comprometidos a peligros provenientes del cráter, puesto que los resultados muestran que el nivel de riesgo asociado a la acción del cráter es bajo. En términos generales el monitoreo usado en la Superintendencia de Geomecánica Operación Los Bronces está permitiendo tener trabajos cercanos al sector borde cráter con buena confiabilidad.
- Los resultados expuestos muestran que el sector Donoso 2 se encuentra estable y el sector de infernillo 5 y 6 por el lado del pit se encuentra bastante estable con un único punto importante a tomar en cuenta que es el bloque activo, el cual se encuentra en constante movimiento pero que se mueve hacia el interior del cráter. Además, los resultados muestran que el bloque activo está bien definido y por el momento no ha mostrado un anclaje de la roca más cercana a la fase. También los datos muestran un avance del cráter hacia el sur, pero sin un contacto cercano con la operación Los Bronces.
- El monitoreo satelital muestra ser una herramienta útil para comprender la evolución del cráter, ya que permite determinar las zonas que van adquiriendo estabilidad como del mismo modo nos muestra las zonas que la pierden. La información reprocesada de los radares permite entender y monitorear procesos de la subsidencia a largo plazo y poder crear un marco referencial de la misma y su punto mas fuerte es que a diferencia del monitoreo satelital

este es en tiempo real.

A pesar de que un grupo de prismas dejo de entregar datos a principios del año 2021, su información sumada a la del grupo de prismas que aun sigue vigente igual fue relevante para reafirmar lo que el monitoreo satelital y radar muestran.

La información entregada por los TDR pese a la existencia de humedad, muestran estabilidad del macizo rocoso a excepción del TDR 09 que tuvo deterioro solo durante el 2021. Los sensores Geo4sight no mostraron ninguna tendencia relevante que permita mostrar el avance del cráter en el subsuelo.

 En síntesis en base a los datos del monitoreo geomecánico el cráter de subsidencia esta creciendo pero no pone en riesgo a las distintas fases colindantes de la mina, pudiéndose así realizar los trabajos con seguridad. Es importante que se hagan mas estudios para detectar posibles mecanismos de movimiento que tal vez no puedan ser detectables en periodos de tiempo corto.

Bibliografía

- Blanco, B. (2013). Análisis de sismicidad inducida periodo 2012-2013 en mina subterránea rio blanco, áreas 17-18 y proyecciones para sistemas de monitoreo microsísmico en proyecto minería continua en codelco división andina. Universidad de Concepción.
- Cavieres, P. (2008). Introducción a los métodos de explotación block caving/ panel caving y sus variantes.
- Dowding, C., Su, M., and O'Connors, K. (1988). Principles of time domain reflectometometry applied to measurement of rock mass deformation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences amp; Geomechanics Abstracts*, 25(5):287–297.
- Godoy, E. (2012). Sobre el variable marco geotectónico de las formarciones abanico y farellones y sus equivalentes al ser de los 35°ls. *Revista de la Asociación Geológica Argentina, 69(4), 570-577.* Recuperado en 31 de mayo de 2022, de http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid= S0004-48222012000400008&lng=es&tlng=es.
- Hustrulid, W. A. (1982). Underground mining methods handbook.
- Karzulovic, A. (1999). Subsidencia por efecto del caving mina el teniente api nº 12500.
- Kumar, A. and Villuri, V. G. (2015). Role of mining radar in mine slope stability monitoring at open cast mines. *Proceedia Earth and Planetary Science*, 11:76–83. Global Challenges, Policy Framework Sustainable Development for Mining of Mineral and Fossil Energy Resources (GCPF:2015–20).
- Monserrat, O., Crosetto, M., and Luzi, G. (2014). A review of ground-based sar interferometry for deformation measurement. *ISPRS Journal of Photogrammetry* and Remote Sensing, 93:40–48.
- O'Connor, K. and Murphy, E. (1997). Tdr monitoring as a component of subsidence risk assessment over abandoned mines. *International Journal of Rock Mechanics* and Mining Sciences, 34(3):230.e1–230.e15.
- Sánchez, C., Monells, D., Manso, A., and Farias, E. (2016). Aplicación de metodología insar en la detección de deformaciones en el cráter de subsidencia y entorno minero. caso de estudio: Codelco mina andina.

Apéndice A

Resultados

A1. Gráficos de los desplazamientos acumulados para el primero periodo de tiempo.



Figura A1.1: Gráfico de los desplazamientos acumulados de la zona número 1 o llamada Zona norte del cráter de subsidencia. (Ver Figura 6.1.2).



A1. Gráficos de los desplazamientos acumulados para el primero periodo de 104 tiempo.

Figura A1.2: Gráfico de los desplazamientos acumulados de la zona número 2 o llamada Ladera noreste del cráter de subsidencia. (Ver Figura 6.1.2).



Figura A1.3: Gráfico de los desplazamientos acumulados de la zona número 3 o llamada Zona noroeste del cráter de subsidencia. (Ver Figura 6.1.2).



Figura A1.4: Gráfico de los desplazamientos acumulados de la zona número 4 o llamada Zona Infiernillo inferior. (Ver Figura 6.1.2).



A1. Gráficos de los desplazamientos acumulados para el primero periodo de tiempo.

Figura A1.5: Gráfico de los desplazamientos acumulados de la zona número 5 o llamada Zona interior del cráter de subsidencia. (Ver Figura 6.1.2).



Figura A1.6: Gráfico de los desplazamientos acumulados de la zona número 6 o llamada Zona Infiernillo superior. (Ver Figura 6.1.2).



Figura A1.7: Gráfico de los desplazamientos acumulados de la zona número 7 o llamada Zona sur 1. (Ver Figura 6.1.2).

A1. Gráficos de los desplazamientos acumulados para el primero periodo de 106 tiempo.



Figura A1.8: Gráfico de los desplazamientos acumulados de la zona número 8 o llamada Zona sur 2. (Ver Figura 6.1.2).



Figura A1.9: Gráfico de los desplazamientos acumulados de la zona número 9 o llamada Zona sur 3. (Ver Figura 6.1.2).

A2. Gráficos de los desplazamientos acumulados para el segundo periodo de tiempo. 107

A2. Gráficos de los desplazamientos acumulados para el segundo periodo de tiempo.



Figura A2.1: Gráfico de los desplazamientos acumulados de la zona número 1 o llamada Zona noroeste del cráter de subsidencia. (Ver Figura 6.1.3).



Figura A2.2: Gráfico de los desplazamientos acumulados de la zona número 2 o llamada Ladera noreste del cráter de subsidencia para el segundo periodo. (Ver Figura 6.1.3).



A2. Gráficos de los desplazamientos acumulados para el segundo periodo de 108 tiempo.

Figura A2.3: Gráfico de los desplazamientos acumulados de la zona número 3 o llamada Zona oeste del cráter de subsidencia. (Ver Figura 6.1.3).



Figura A2.4: Gráfico de los desplazamientos acumulados de la zona número 4 o llamada Zona Infiernillo inferior para el segundo periodo. (Ver Figura 6.1.3).



Figura A2.5: Gráfico de los desplazamientos acumulados de la zona número 5 o llamada Zona interior del cráter de subsidencia para el segundo periodo. (Ver Figura 6.1.3).



A2. Gráficos de los desplazamientos acumulados para el segundo periodo de tiempo.

Figura A2.6: Gráfico de los desplazamientos acumulados de la zona número 6 o llamada Zona sur 1 para el segundo periodo. (Ver Figura 6.1.3).



Figura A2.7: Gráfico de los desplazamientos acumulados de la zona número 7 o llamada Zona sur 2 para el segundo periodo. (Ver Figura 6.1.3).



Figura A2.8: Gráfico de los desplazamientos acumulados de la zona número 8 o llamada Zona sur 3 para el segundo periodo. (Ver Figura 6.1.3).

A2.	Gráficos de los	desplazamientos	acumulados p	oara el	segundo	periodo de
110						tiempo.



Figura A2.9: Gráfico de los desplazamientos acumulados de la zona número 9 o llamada Zona sur 4 para el segundo periodo. (Ver Figura 6.1.3).