

**UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS**

**ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**



**T E S I S**

**Interpretación del monitoreo de cable TDR para el control del cono de  
subsistencia del Cuerpo Esperanza en la U.M. Yauricocha**

**Para optar el título profesional de:**

**Ingeniero de Minas**

**Autor:**

**Bach. Jonathan Gerson ESTRADA ARMAS**

**Asesor:**

**Dr. Agustín Arturo AGUIRRE ADAUTO**

**Cerro de Pasco – Perú – 2024**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS**

**ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**



**T E S I S**

**Interpretación del monitoreo de cable TDR para el control del cono de  
subsistencia del Cuerpo Esperanza en la U.M. Yauricocha**

**Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:**

---

**Mg. Edgar ALCANTARA TRUJILLO**  
**PRESIDENTE**

---

**Mg. Luis Alfonso UGARTE GUILLERMO**  
**MIEMBRO**

---

**Ing. Julio Cesar SANTIAGO RIVERA**  
**MIEMBRO**



Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión  
Facultad de Ingeniería de Minas  
Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de Minas



## INFORME DE ORIGINALIDAD N° 051 -2024

La Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión ha realizado el análisis con exclusiones en el Software Turnitin Originality, que a continuación se detalla:

Presentado por:

**Bach. Jonathan Gerson ESTRADA ARMAS**

Escuela de Formación Profesional  
Ingeniería de Minas

Tipo de trabajo:  
Tesis

Título del trabajo

***“Interpretación del monitoreo de cable TDR para el control del cono de subsidencia del Cuerpo Esperanza en la U.M. Yauricocha.”***

Asesor:

**Dr. Agustín Arturo AGUIRRE ADAUTO**

Índice de Similitud: 10 %

Calificativo  
**APROBADO**

Se adjunta al presente el informe y el reporte de evaluación del software similitud.

Cerro de Pasco, 11 de octubre de 2024.

Sello y Firma del responsable  
de la Unidad de Investigación

## **DEDICATORIA**

La presente investigación está dedicada a mis padres Anatolio y Lucía que a lo largo de mi vida me han brindado su apoyo incondicional, pues sin ellos no estaría logrando mis objetivos.

A mis hermanos José, Emely, Frank y Gustavo por sus consejos y pautas a lo largo de mi vida de aprendizaje diario, ya que de esa manera impulsaron a que día a día me esfuerce para ser mejor persona y profesional.

A dios por guiar mi camino y por dirigirme por el sendero correcto, que en todo momento está conmigo ayudándome a mejorar como persona y cuidar de mi en cada paso que doy.



## **AGRADECIMIENTO**

Mediante la presente investigación tengo el placer de expresar mi más sincero agradecimiento a la unidad minera por permitirme crecer profesionalmente aplicando mis conocimientos y profundizando más en temas como el que desarrollé en la presente investigación, así mismo, dar las gracias al Departamento de Geomecánica, a mis compañeros de trabajo por su apoyo, su confianza y sus enseñanzas.

Me es grato reconocer mi gratitud a los docentes de la Escuela de Formación Profesional de Ingeniería de Minas de la Facultad de Minas de mi alma máter Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, ya que, gracias a sus pautas, sus enseñanzas en las aulas de la universidad fortalecieron mis conocimientos en el mundo de la minería.

## RESUMEN

En la Mina Yauricocha se tiene inestabilidad en las labores de explotación que son minados mediante el método Hundimiento por Subniveles en el Cuerpo Esperanza; que actualmente se está minando el Nivel 1120, piso 0, profundidad de 940 metros aproximadamente. En esta zona se presenta acumulación de agua subterránea en la estructura mineralizada y los esfuerzos altos por la profundidad de la labor ocasiona deslizamiento de lodo y genera demoras operativas, deformación de las cimbras, paralización de la labor y, como consecuencia, se presenta alto riesgo para el personal que realiza sus tareas en los tajeos. Por lo cual, se ha tomado la decisión de implementar el monitoreo geotécnico de cable TDR (Reflectómetro de dominio del tiempo) que nos permita interpretar el estado del cono de subsidencia con respecto al ascenso de la bóveda y pilar de la corona.

Mediante las inspecciones realizadas, nivel por nivel, de las zonas minadas del Cuerpo Esperanza se ha construido un modelo de vacíos (zonas sin ningún tipo de relleno) y teniendo los datos de las longitudes de dos cables TDR se ha construido el cono de subsidencia; por lo que, se estiman los valores finales de los esfuerzos inducidos por el método de minado. Los datos del monitoreo se han recopilado del cable TDR de manera remota utilizando el instrumento “gateway” el cual trasmite la información hacia la computadora del usuario.

Los resultados nos muestran que si los cables TDR se acortan entonces el crecimiento de los esfuerzos será mayor, las cimbras tendrán mayor deformación, el caving (bóveda) tendrá mayor crecimiento y un menor crown pillar (puente).

**Palabras clave:** Cable TDR, interpretación del monitoreo, cono de subsidencia.

## ABSTRACT

In the Yauricocha Mine, instability is present in the mining operations carried out using the Sublevel Caving method in the Esperanza Body, where mining is currently taking place at Level 1120, floor 0, approximately 940 meters deep. In this area, the accumulation of underground water in the mineralized structure and the high stress levels due to the depth of the operation cause mud sliding, leading to operational delays, timber deformation, labor stoppages, and, consequently, high risk to the personnel performing tasks in the stopes.

As a result, the decision has been made to implement geotechnical monitoring using TDR cables (Time Domain Reflectometer) to interpret the state of the subsidence cone concerning the upward movement of the vault and crown pillar. Based on inspections conducted level by level in the mined-out areas of the Esperanza Body, a void model (zones without any filling) has been constructed. Using the data from the lengths of two TDR cables, the subsidence cone has been modeled, and the final values of the induced stresses caused by the mining method have been estimated.

The monitoring data has been collected remotely via TDR cables using a "gateway" instrument, which transmits the information to the user's computer.

The results show that if the TDR cables shorten, the growth of stresses will increase, timber deformation will be greater, the caving (vault) will expand further, and the crown pillar (bridge) will diminish.

**Keywords:** TDR cable, monitoring interpretation, subsidence cone.

## **INTRODUCCIÓN**

A lo largo de los años se han aplicado diferentes estrategias para el control de la deformación e ingreso del agua subterránea dentro del cono de subsidencia evitando de esta manera el deslizamiento de lodo en las ventanas de explotación, por lo que se ha optado por implementar el monitoreo geotécnico de Cable TDR, dado el problema de inestabilidad en el Cuerpo Esperanza y la interpretación a través de modelos nos permite tomar decisiones en base a protocolos de seguridad para prevenir riesgos hacia el personal.

Para la elaboración del presente trabajo de investigación se han desarrollado los siguientes temas: En el Capítulo I se ha tratado el problema de investigación, en el Capítulo II se desarrolló el marco teórico, en el Capítulo III se trató la metodología y técnicas de investigación y, en el Capítulo IV se explicó los resultados y discusión. Finalmente, se incluyen las conclusiones y las recomendaciones para la implementación de esta propuesta; lo cual presento a mis jurados para su calificación correspondiente.

Jonathan Gerson, ESTRADA ARMAS

Tesista

## ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

ÍNDICE

ÍNDICE DE CUADROS

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

## CAPÍTULO I

### PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1.	Identificación y determinación del problema.....	1
1.2.	Delimitación de la investigación .....	2
1.3.	Formulación del problema .....	17
	1.3.1. Problema general.....	17
	1.3.2. Problemas específicos .....	17
1.4.	Formulación de Objetivos .....	17
	1.4.1. Objetivo general .....	17
	1.4.2. Objetivos específicos.....	17
1.5.	Justificación de la investigación.....	17
1.6.	Limitaciones de la investigación .....	19

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

2.1.	Antecedentes de estudio .....	20
------	-------------------------------	----

2.2.	Bases teóricas – científicas.....	24
2.3.	Definición de términos básicos .....	42
2.4.	Formulación de Hipótesis.....	44
	2.4.1. Hipótesis general .....	44
	2.4.2. Hipótesis específicas .....	44
2.5.	Identificación de Variables.....	44
2.6.	Definición Operacional de variables e indicadores.....	44

### **CAPÍTULO III**

#### **METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN**

3.1.	Tipo de investigación .....	46
3.2.	Nivel de investigación .....	46
3.3.	Métodos de investigación.....	46
3.4.	Diseño de investigación .....	47
3.5.	Población y muestra .....	47
3.6.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	47
3.7.	Técnicas de procesamiento y análisis de datos .....	48
3.8.	Tratamiento Estadístico.....	48
3.9.	Orientación ética filosófica y epistémica .....	48

### **CAPÍTULO IV**

#### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

4.1.	Descripción del trabajo de campo .....	49
4.2.	Presentación, análisis e interpretación de resultados .....	99
4.3.	Prueba de Hipótesis .....	123
4.4.	Discusión de resultados .....	126

#### **CONCLUSIONES**

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXOS

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1</b> Vías de acceso .....	3
<b>Cuadro 2</b> Variables e indicadores de operación .....	45
<b>Cuadro 3</b> Condición inicial de instrumentación de cable TDR.....	58
<b>Cuadro 4</b> Familias de discontinuidades estructurales .....	73
<b>Cuadro 5</b> Aspectos estructurales en Fallas .....	75
<b>Cuadro 6</b> Aspectos estructurales en Diaclasas .....	75
<b>Cuadro 7</b> Resultados del monitoreo de cable TDR.....	104
<b>Cuadro 8</b> Cálculo de ISR y FF .....	106
<b>Cuadro 9</b> Condición de las discontinuidades .....	107
<b>Cuadro 10</b> Resultado RMRLb.....	108
<b>Cuadro 11</b> Cálculo de ISR y FF .....	109
<b>Cuadro 12</b> Resultado MRMR.....	110
<b>Cuadro 13</b> Cálculo del Radio Hidráulico .....	112
<b>Cuadro 14</b> Resultados finales interpretación cable TDR .....	121



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Recursos minables tonelajes y leyes.....	9
<b>Tabla 2</b> Parámetros geométricos para considerar en el diseño de Sublevel Caving.....	34
<b>Tabla 3</b> Evolución del cave-back y mecanismos de propagación .....	37
<b>Tabla 4</b> Condición de esfuerzos en la cavidad .....	38
<b>Tabla 5</b> Criterios de clasificación del macizo rocoso .....	76
<b>Tabla 6</b> Criterios de clasificación del macizo rocoso .....	76
<b>Tabla 7</b> Ensayo de compresión simple (UCS).....	77
<b>Tabla 8</b> Ensayo triaxial (TX).....	78
<b>Tabla 9</b> Resistencia a la tracción de la roca intacta .....	79
<b>Tabla 10</b> Propiedades físicas de la roca intacta .....	80
<b>Tabla 11</b> Ensayo de corte directo en discontinuidades.....	80
<b>Tabla 12</b> Propiedades de resistencia de la masa rocosa.....	81
<b>Tabla 13</b> Protocolos de seguridad en base al monitoreo de cable TDR .....	122

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Ubicación provincia de Yauyos .....	2
<b>Figura 2</b> Accesibilidad: Lima – Mina Yauricocha .....	3
<b>Figura 3</b> Accesibilidad: Huancayo – Mina Yauricocha .....	4
<b>Figura 4</b> Geología estructural de la unidad minera .....	6
<b>Figura 5</b> Vista longitudinal de las estructuras mineralizadas de la unidad minera .....	7
<b>Figura 6</b> Vista longitudinal de las estructuras mineralizadas de la unidad minera .....	8
<b>Figura 7</b> Vista longitudinal Mina Central.....	11
<b>Figura 8</b> Método de explotación Sublevel Caving .....	13
<b>Figura 9</b> Elipsoide de extracción .....	14
<b>Figura 10</b> Diseño de draw point .....	15
<b>Figura 11</b> Ciclo de minado – Sublevel Caving.....	16
<b>Figura 12</b> Instalación típica de un cable TDR.....	25
<b>Figura 13</b> Data logger en monitoreo de cable TDR .....	26
<b>Figura 14</b> Diseño Sublevel Caving.....	27
<b>Figura 15</b> Vista tridimensional del modelo de subsidencia.....	28
<b>Figura 16</b> Vista tridimensional de los cables TDR ubicados alrededor de los conos ...	29
<b>Figura 17</b> Estructura interna del caving con instalación del cable TDR.....	30
<b>Figura 18</b> Teoría del Elipsoide .....	33
<b>Figura 19</b> Simulación típica que muestra la elipse dibujada. ....	33
<b>Figura 20</b> Diseño en los drawpoints en Sublevel Caving.....	34
<b>Figura 21</b> Modelo conceptual de propagación del hundimiento. ....	36
<b>Figura 22</b> Ábaco empírico para cuantificar el mecanismo de hundimiento.....	39
<b>Figura 23</b> Sistema de monitoreo geotécnico en tiempo real .....	40
<b>Figura 24</b> Modelamiento numérico de una excavación.....	42

<b>Figura 25</b> Charla de seguridad.....	50
<b>Figura 26</b> Acople del cable y tubería.....	51
<b>Figura 27</b> Unión mediante cinta galvanizada .....	51
<b>Figura 28</b> Mezcla de lechada de cemento .....	52
<b>Figura 29</b> SSTDR enviando datos a una Gateway .....	53
<b>Figura 30</b> Funcionamiento SSTDR .....	54
<b>Figura 31</b> Interfaz monitoreo remoto .....	55
<b>Figura 32</b> Gateway – data remota.....	57
<b>Figura 33</b> Ubicación de cable TDR 01, 02 y antena Gateway .....	58
<b>Figura 34</b> Ubicación de TDR 01 y 02 – Google Earth.....	58
<b>Figura 35</b> Acceso a la Gateway – interfaz del monitoreo remoto .....	59
<b>Figura 36</b> Monitoreo remoto y monitoreo en campo .....	60
<b>Figura 37</b> Plataforma Google para ingreso al monitoreo remoto.....	61
<b>Figura 38</b> Interfaz CMT Edge del monitoreo de TDR .....	61
<b>Figura 39</b> Menú de opciones TDR 1 y TDR 2 .....	61
<b>Figura 40</b> Visualización de la última lectura voltaje y longitud.....	62
<b>Figura 41</b> Datos compilados del mes descargados en formato csv .....	62
<b>Figura 42</b> Ordenamiento de los datos.....	63
<b>Figura 43</b> Visualización de los cambios de longitud de lo cable TDR .....	63
<b>Figura 44</b> Equipo de monitoreo de cable TDR data logger.....	64
<b>Figura 45</b> Verificación del área de trabajo .....	65
<b>Figura 46</b> Caseta del cable TDR.....	65
<b>Figura 47</b> Interior de la caseta, sistema de monitoreo .....	66
<b>Figura 48</b> Conexión del cable TDR al equipo data logger. ....	66
<b>Figura 49</b> Monitoreo de cable TDR, gráfica de longitud .....	67

<b>Figura 50</b>	Sistema de monitoreo microsísmico .....	68
<b>Figura 51</b>	Ubicación de la zona monitoreada .....	69
<b>Figura 52</b>	Velocidad de desplazamiento zona de interés .....	70
<b>Figura 53</b>	Vista perfil Esperanza y vista en planta de la zona de monitoreo .....	71
<b>Figura 54</b>	Proyección estereográfica de contornos de discontinuidades .....	73
<b>Figura 55</b>	Proyección estereográfica de familias principales de discontinuidades .....	74
<b>Figura 56</b>	Diagrama de roseta del compuesto de discontinuidades .....	74
<b>Figura 57</b>	Composito de labores de explotación del Cuerpo Esperanza .....	83
<b>Figura 58</b>	Contorno de minado – vista 2D .....	84
<b>Figura 59</b>	Contorno de minado – vista isométrica 3D.....	85
<b>Figura 60</b>	Sólido 3D zona explotada Nivel 870 .....	86
<b>Figura 61</b>	Sólido 3D zona explotada Nivel 920 .....	86
<b>Figura 62</b>	Sólido 3D zona explotada Nivel 970 .....	86
<b>Figura 63</b>	Sólido 3D zona explotada Nivel 1020 .....	87
<b>Figura 64</b>	Sólido 3D zona explotada Nivel 1070 .....	87
<b>Figura 65</b>	Sólido 3D zona explotada Nivel 1120 .....	87
<b>Figura 66</b>	Modelamiento 3D de los niveles y pisos explotados .....	88
<b>Figura 67</b>	Minado del cuerpo Esperanza y proyección de los cables TDR.....	89
<b>Figura 68</b>	Línea de corte en la zona de interés a analizar.....	91
<b>Figura 69</b>	Sección A-A' corte longitudinal de la zona sin perturbar.....	92
<b>Figura 70</b>	Malla de elementos finitos de la sección A-A' .....	93
<b>Figura 71</b>	Análisis del esfuerzo principal sigma 1 (MPa).....	94
<b>Figura 72</b>	Línea de corte en la zona de interés a analizar.....	95
<b>Figura 73</b>	Sección A-A' corte longitudinal de la zona de estudio.....	96
<b>Figura 74</b>	Malla de elementos finitos de la sección A-A' .....	97

<b>Figura 75</b> Análisis del esfuerzo principal sigma 1 (MPa).....	98
<b>Figura 76</b> Estado inicial de los cables TDR .....	100
<b>Figura 77</b> Seccionamiento del cable TDR 02 (25/06/2022).....	101
<b>Figura 78</b> Seccionamiento del cable TDR 02 (07/08/2022).....	102
<b>Figura 79</b> Seccionamiento del cable TDR 01 (12/01/2023).....	103
<b>Figura 80</b> Monitoreo de cable TDR con las fechas de seccionamiento. ....	104
<b>Figura 81</b> Altura total de vacío asumido, cuerpo Esperanza.....	111
<b>Figura 82</b> Ábaco de Laubscher para definir radio hidráulico en caso de caving .....	112
<b>Figura 83</b> Modelo conceptual del cono de subsidencia.....	113
<b>Figura 84</b> Modelo 3D del cono de subsidencia .....	114
<b>Figura 85</b> Modelo 3D del cono de fracturamiento .....	115
<b>Figura 86</b> Línea de corte de la zona de interés A-A' .....	116
<b>Figura 87</b> Corte longitudinal A-A' .....	117
<b>Figura 88</b> Malla de elementos finitos del cono de subsidencia.....	118
<b>Figura 89</b> Esfuerzo principal Sigma 1 – Cono de Subsidencia .....	119
<b>Figura 90</b> Deformación de las cimbras en las labores de explotación .....	120
<b>Figura 91</b> Correlación del cable TDR en el monitoreo del caving.....	124
<b>Figura 92</b> Correlación hipótesis específica 1 .....	125

## **CAPÍTULO I**

### **PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

#### **1.1. Identificación y determinación del problema**

La unidad minera Acumulación Yauricocha, desde el año 2004 aprovechando las condiciones de la estructura mineralizada y la calidad del macizo rocoso viene realizando la explotación por el método de minado de Sublevel Caving, un método no común en la minería peruana, el método mencionado consiste en utilizar el flujo gravitacional después de realizar la voladura en taladros largos con el objetivo de que el mineral descienda hacia las labores de explotación debido a que es método de hundimiento por subniveles ocasiona grandes problemas de estabilidad por la formación de la subsidencia que se evidencia en la superficie de acuerdo a la zona explotada, por lo tanto, se plantea la interpretación del monitoreo de cable TDR para el control del cono de subsidencia del cuerpo Esperanza de la unidad minera.

## 1.2. Delimitación de la investigación

### 1.2.1. Ubicación

La mina Acumulación Yauricocha se encuentra en el Valle "U," en los distritos de Alis y Laraos, en la provincia de Yauyos, que es parte del departamento de Lima, en la sierra del centro-oeste de Perú. La zona operativa de la mina, dentro de la extensión total de la concesión minera, se localiza en las coordenadas 423,074.00 metros Este y 8,638,979.00 metros Norte en la zona UTM 18L.

#### Figura 1

*Ubicación provincia de Yauyos*



Fuente: Elaboración propia.

### 1.2.2. Accesibilidad

La Unidad Minera Yauricocha cuenta con tres vías de acceso distintas, siendo las principales la carretera Central y la carretera de la Panamericana Sur.

Las rutas disponibles son las siguientes:

#### Cuadro 1

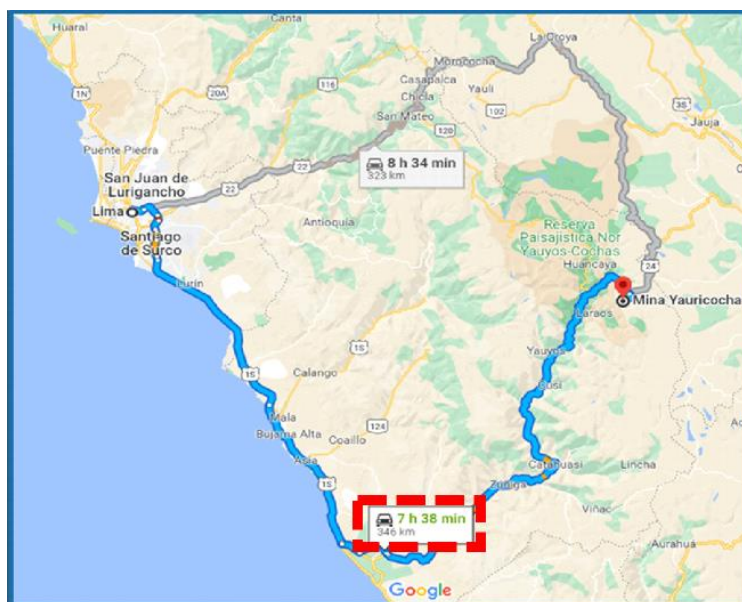
*Vías de acceso*

Ruta 1 (Vía terrestre - Panamericana Sur)			
Tramo	Ruta	Distancia	Tiempo
1	Lima - Cañete	154.7 km	2 hrs 37 min
2	Cañete - Yauyos	135.4 km	3 hrs 23 min
3	Yauyos - Yauricocha	67.6 km	1 hr 38 min
<b>Tiempo total</b>			<b>7 hrs 38 min</b>
Ruta 2 (Vía área y vía terrestre)			
Tramo	Ruta	Distancia	Tiempo
1	Lima - Jauja	180 km	1 hr 11 min
2	Jauja - Huancayo	48.7 km	1 hr 09 min
3	Huancayo - Yauricocha	106.8 km	2 hrs 41 min
<b>Tiempo Total</b>			<b>5 hrs 03 min</b>

Fuente: Elaboración propia.

#### Figura 2

*Accesibilidad: Lima – Mina Yauricocha*

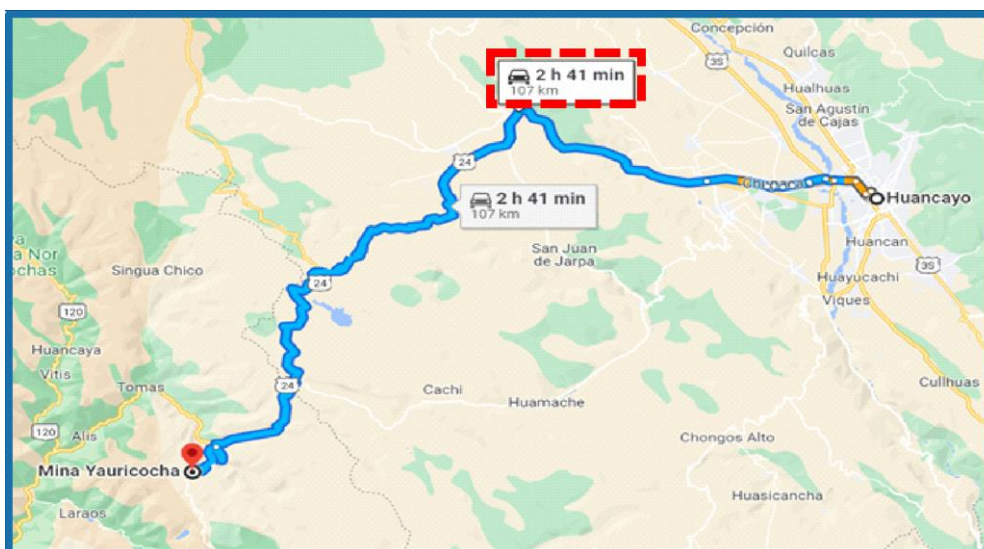


Fuente: Google Maps.



### Figura 3

*Accesibilidad: Huancayo – Mina Yauricocha*



Fuente: Google Maps.

#### 1.2.3. Geología regional

Rendon, G. (2020). La unidad minera contiene varios depósitos de reemplazo de carbonatos, al menos un skarn y algunas vetas de metales epitermales. La mayoría de la estratigrafía en Perú está tanto espacial como genéticamente vinculada con la evolución tectónica de la cordillera de los Andes. Los depósitos minerales del complejo minero están asociados al stock de Yauricocha, una intrusión del Mioceno compuesta por granodiorita y cuarzomonzonita.

- Formación Goyllarisga
- Formación Jumasha
- Formación Celendín
- Capas Rojas Casapalca
- Intrusiones
- Metamorfismo

#### **1.2.4. Geología local**

Cabello, J. (2018). Los diversos yacimientos son irregulares y se orientan de manera paralela a la dirección general de los estratos predominantes, que van de noroeste a sureste. Estos yacimientos presentan ángulos de inclinación pronunciados hacia el noreste, con un espesor promedio que varía entre 10 y 40 metros.

La mayoría de los yacimientos se encuentran en el grupo Jumasha de la caliza, situados dentro y a lo largo del contacto con las lutitas Celendín (France Chert) y en el contacto con las rocas intrusivas.

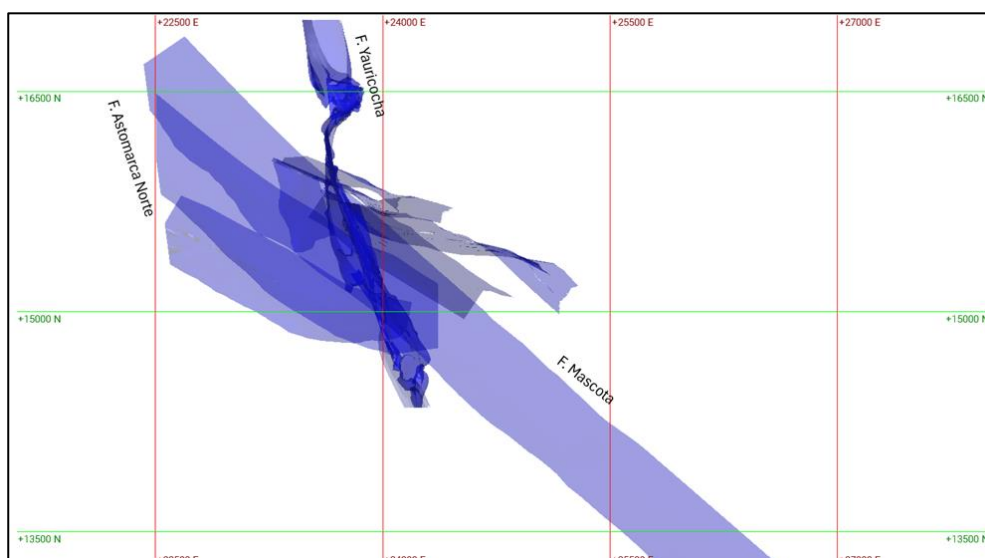
#### **1.2.5. Geología estructural**

Rendon, G. (2020). La disposición estructural local de la Unidad Minera, como consecuencia de los movimientos tectónicos que ocasionaron el levantamiento de la Cordillera de los Andes, exhibe una dirección predominante de NW-SE. Esta estructura se compone principalmente de los siguientes elementos:

- Fallas
- Fracturas
- Contactos
- Brechas

## Figura 4

### *Geología estructural de la unidad minera*



Fuente: Elaboración propia.

#### **1.2.6. Estructuras mineralizadas**

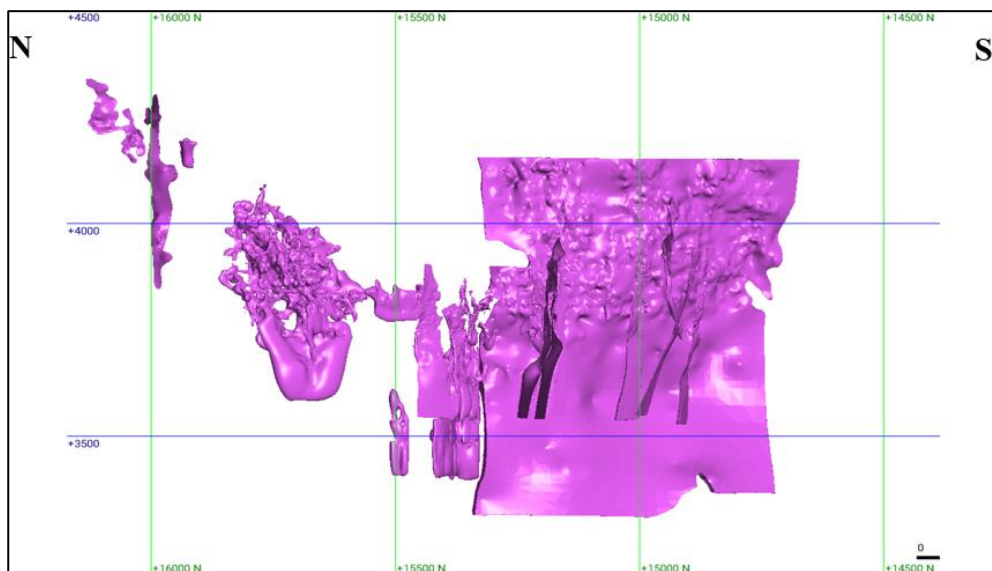
Como en toda unidad minera que constantemente realiza exploración brownfield y se logra ubicar estructuras mineralizadas cuyo valor supera al de los gastos, lo mismo sucede con la unidad minera que tienen una gran cantidad de estructuras mineralizadas tanto en mina central como en mina cachi cachi, desde cuerpos con mayor potencia y longitud que son minados por SLC hasta cuerpos pequeños que se explotan mediante corte y relleno ascendente, dichas estructuras poseen alto valor en cobre (Cu), zinc (Zn), plomo (Pb), plata (Ag) y una cantidad mínima de oro (Au).

Los cuerpos de mineral clasificados como masivos incluyen: Esperanza, Esperanza Distal, Angelita, Karlita, Antacaca Sur, Rosaura, Antacaca Sur, Esperanza Sur y Cuye.

Los cuerpos minerales considerados de tamaño más reducido son: Fortuna, Fortuna Norte, Gallito, Carmencita, Carmencita Sur, Elissa, Escondida, Privatizadora, Kimberly, Sulma, Vanessa, Yoselim, Butz, entre otros.

### **Figura 5**

*Vista longitudinal de las estructuras mineralizadas de la unidad minera*



Fuente: Elaboración propia.

#### **1.2.7. Recursos y reservas**

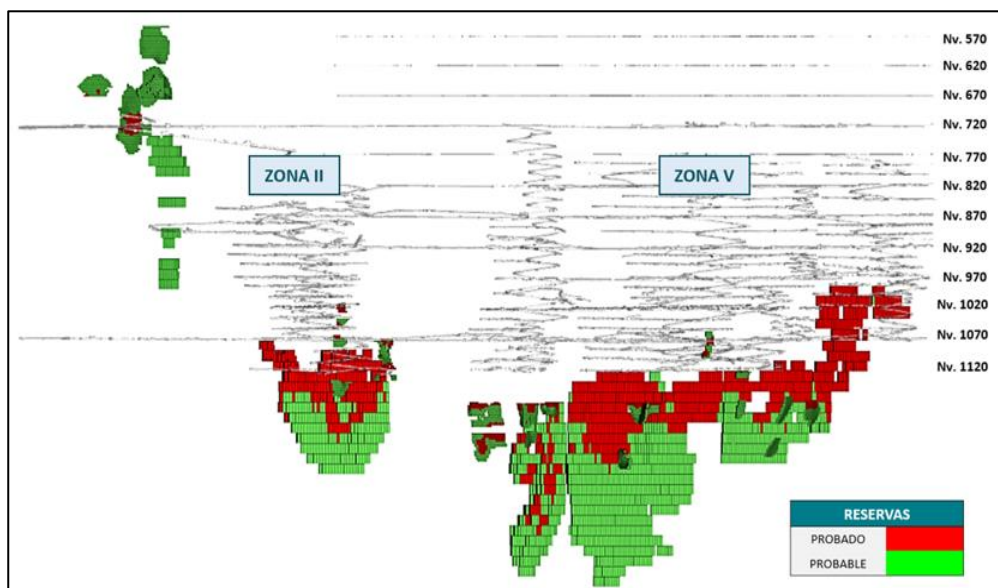
Como resultado de investigaciones geológicas continuas en la Unidad Minera, se han descubierto mayores recursos minerales en áreas previamente explotadas y en profundidad para distintas vetas y cuerpos, con una estimación hasta julio de 2031, considerando recursos medidos, indicados e inferidos.

El depósito minero está compuesto por cuerpos minerales de skarn y reemplazos polimetálicos, así como por vetas alojadas en intrusiones relacionadas con el magmatismo del Mioceno. La mineralización está fuertemente influenciada por la estructura geológica, siendo la Falla de Yauricocha y el contacto entre las calizas de la Formación Jumasha y la Formación Celendín (especialmente el Chert de Francia) los rasgos predominantes de control.

La mineralización comprende áreas con diferentes grados de oxidación en un sistema polimetálico, manifestándose en vetas de sulfuros que atraviesan cuerpos de sulfuros polimetálicos. La mineralización "polimetálica" abarca sulfuros de plomo y zinc, a menudo con valores notables de plata. El término "óxido" hace referencia a la mineralización compuesta principalmente por sulfuros oxidados, óxidos supergénicos resultantes, hidróxidos y/o carbonatos (en ocasiones con presencia de oro anómalo). La categorización "cobre" hace referencia a zonas con valores elevados de cobre y poco plomo y zinc asociados.

**Figura 6**

*Vista longitudinal de las estructuras mineralizadas de la unidad minera*



Fuente: Departamento de Planeamiento.

**Tabla 1***Recursos minables toneladas y leyes*

CUERPO	Toneladas (t)	Ag (Oz/t)	Pb (%)	Cu (%)	Zn (%)	Au (gr/t)	NSR (\$r/t)	Fe (%)
ANTACACA	1,105,103	0.50	0.12	1.20	0.76	0.36	74.93	20.27
ANTACACA SUR	206,586	0.58	0.03	0.96	0.58	0.34	60.84	17.66
BUTZ	11,258	1.31	1.28	0.19	7.23	0.26	133.34	6.74
CARMENCITA	7,598	3.20	0.14	1.29	0.28	0.32	102.75	16.51
CATAS	5,123,365	0.55	0.13	0.94	0.94	0.41	66.11	22.10
CONTACTO OCCIDENTAL	58,587	1.53	0.39	0.22	3.87	0.12	81.41	9.97
CONTACTO ORIENTAL	182,258	2.69	1.61	0.19	7.42	0.23	155.56	15.38
CSM-0	21,255	1.39	0.60	0.09	6.45	0.29	109.69	11.80
CSM-I	8,746	1.46	1.22	0.06	6.51	0.08	118.12	2.62
CSM-II	255,131	5.09	6.36	0.12	7.96	0.17	257.90	6.70
CUYE	1,617,236	0.60	0.07	1.16	0.65	0.39	72.29	23.80
CUYE SUR	1,259,144	0.29	0.01	1.14	0.25	0.30	61.72	30.23
ESPERANZA	2,535,968	1.89	0.92	1.29	2.47	0.24	127.46	19.32
ESPERANZA DISTAL	262,285	2.04	1.97	0.69	4.33	0.19	139.20	13.90
ESPERANZA SUR	45,150	0.87	0.28	0.25	5.29	0.29	92.44	15.39
FORTUNA 7	6,418	0.96	0.43	1.46	1.40	0.20	104.31	9.14
FORTUNA 8	321,821	1.93	0.55	0.70	1.73	0.36	85.43	20.61
FORTUNA NORTE	55,624	1.98	2.59	0.57	7.52	0.36	183.05	13.26
FORTUNA_P	374,593	1.32	0.69	1.17	2.18	0.36	108.70	15.98
GALLITO SUR	16,700	2.39	0.87	0.31	1.61	0.12	74.29	8.20
KATTY	1,866	1.11	0.77	0.10	7.90	0.37	127.94	12.90
KIMBERLY	29,665	0.89	0.01	1.49	0.05	0.23	81.81	18.69
MASCOTA POLI ESTE	208,492	2.54	1.08	0.55	5.35	0.44	138.47	17.61
MASCOTA POLI NORTE	95,567	3.34	5.70	0.38	8.58	0.41	249.94	8.75
MASCOTA POLI NORTE II	9,192	3.44	8.14	0.09	10.70	0.26	300.36	11.37
MASCOTA POLI SUR	15,125	1.99	0.37	0.22	5.70	0.18	108.67	12.11
MASCOTA POLI SUR II	20,123	1.34	0.22	0.39	2.96	0.32	74.32	15.88
PRIVATIZADORA	9,284	1.65	0.51	0.18	3.02	0.34	72.99	21.38
ROSAURA	1,108,862	0.53	0.09	0.97	0.89	0.34	65.69	20.11
SULMA	8,310	2.50	1.51	0.33	1.64	0.46	88.15	9.69
VETA GALLITO	7,228	0.74	1.80	0.06	2.90	0.09	74.96	5.16
<b>Total general</b>	<b>14,998,540</b>	<b>0.97</b>	<b>0.45</b>	<b>1.02</b>	<b>1.53</b>	<b>0.35</b>	<b>86.35</b>	<b>21.32</b>

Fuente: Departamento de planeamiento.

**1.2.8. Descripción de la mina****1.2.8.1. Mina central**

La mayor parte de la producción de mina Yauricocha está en Mina Central ya que hay diversas zonas de explotación siendo la más

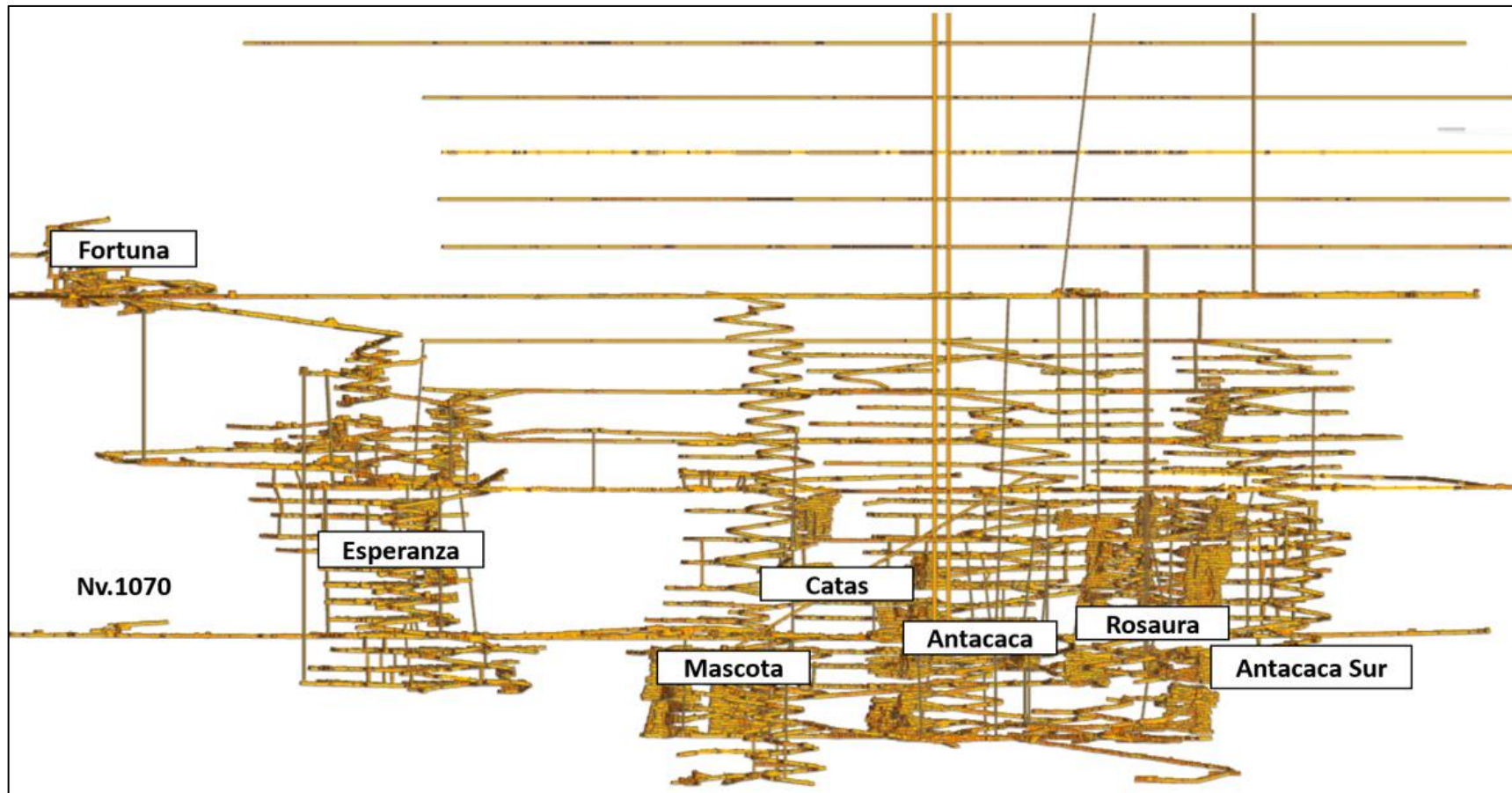
importante el cuerpo Esperanza y el método aplicado es 100% Sub Level Caving para las reservas de dicha estructura mineralizada, el acceso principal para el personal se realiza a través del Pique Central, así mismo se cuenta con el túnel Yauricocha de 5km de longitud con sección de 3.5 x 3.5 m, que está comunicado al pique central y a la planta concentradora Chumpe en el Nv.720.

Para los accesos a las diferentes estructuras mineralizadas y niveles de la mina se realizan excavaciones subterráneas tales como rampas, galerías, cruceros y chimeneas. Los servicios auxiliares con chimeneas convencionales y también con raise borer.

La extracción del mineral y material estéril de los niveles más profundos como el Nv. 1070 y Nv. 1120 del cuerpo esperanza se realiza por el pocket 950 del Pique Central; por otro lado, la extracción de mineral y desmonte de los cuerpos Catas y Rosaura se realiza por el Pocket 1100 del Pique Mascota, por intermedio de las locomotoras todo el material es extraído por el Nv. 720 del túnel Yauricocha y el medio de drenaje por el túnel Klepetko.

**Figura 7**

*Vista longitudinal Mina Central*



Fuente: Elaboración propia.



## **1.2.9. Método de explotación**

### **1.2.9.1. Hundimiento por subniveles (Sublevel Caving)**

El método Sublevel Caving (hundimiento por subniveles) El método Sublevel Caving (hundimiento por subniveles) nació originalmente como un método aplicable a roca incompetente que colapsaba inmediatamente después de retirar la fortificación. Se construían galerías fuertemente sostenidas a través del cuerpo mineralizado, se retiraba la fortificación y el mineral se hundía espontáneamente para luego ser transportado fuera de la mina.

El método SLC se aplica de preferencia en cuerpos de forma tabular, verticales o subverticales, de grandes dimensiones, tanto en espesor como en su extensión vertical. También es aplicable en yacimientos masivos.

La roca circundante, o más específicamente la superpuesta, debe ser poco competente, de modo que se derrumbe con facilidad ocupando el vacío dejado por la extracción de la roca mineralizada.

Es deseable que la roca mineralizada y el material estéril superpuesto sean fácilmente diferenciables y separables, en el sentido de minimizar su mezcla y por consiguiente la dilución del mineral. El método consiste en dividir el cuerpo mineralizado en subniveles espaciados verticalmente a 16.5 m. En cada subnivel se desarrolla una red de galerías paralelas que cruzan transversalmente el cuerpo, la separación de cada ventana es de 7m.

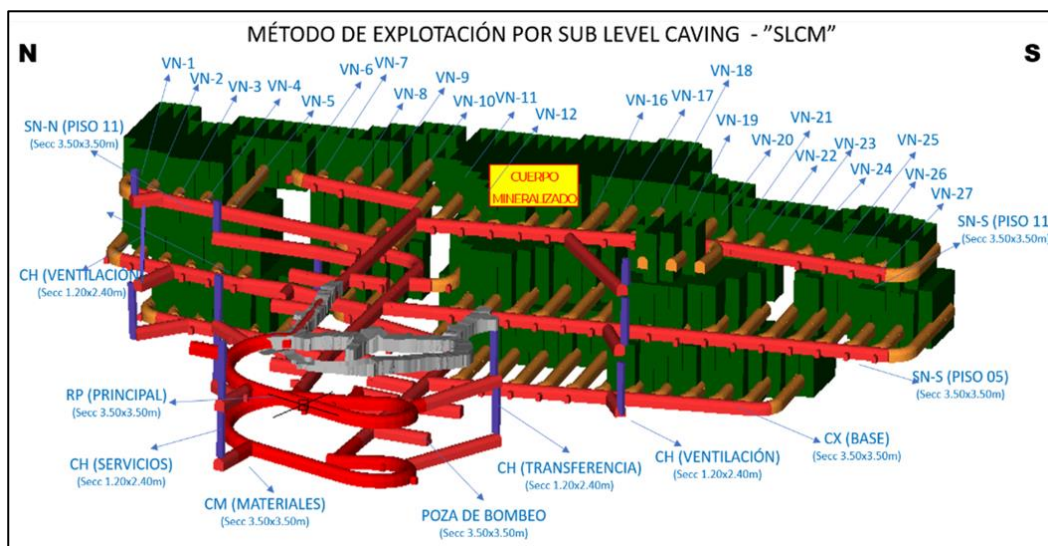
Las galerías de 3.50 x 3.50m de un determinado subnivel se ubican entremedio y equidistantes de las galerías de los subniveles

inmediatamente vecinos. De este modo, toda la sección mineralizada queda cubierta por una malla de galerías dispuestas en una configuración romboidal.

Los desarrollos conforman una rampa que comunica y permite el acceso a todos los subniveles. Galerías de cabecera en cada uno de los subniveles, emplazadas en la roca yacente (footwall), por lo general orientadas según el rumbo y siguiendo el contorno del cuerpo mineralizado.

**Figura 8**

*Método de explotación Sublevel Caving*



Fuente: Departamento de planeamiento.

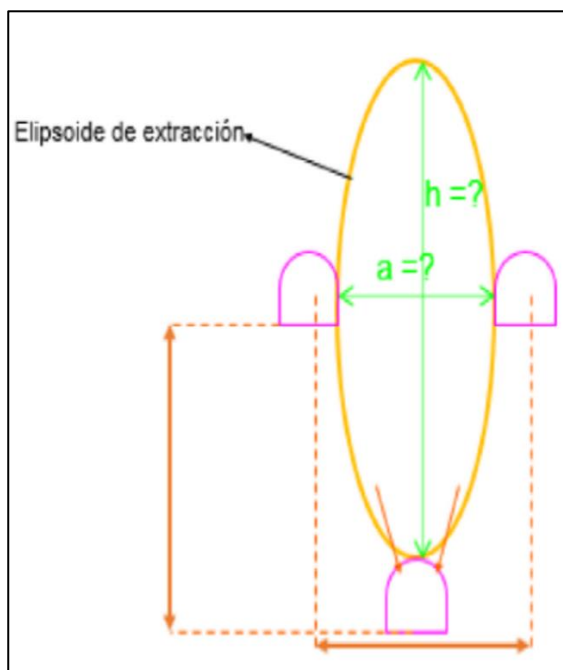
La operación de arranque se inicia en el subnivel superior, en retirada desde los extremos hacia el acceso central y desde el límite más alejado o pendiente (hanging wall) del cuerpo mineralizado hacia el límite yacente (foot wall).

Es importante determinar “a” para hallar la distancia entre Drawpoints. Los factores que influyen para que “a” sea más amplio son los siguientes:

1. Técnica de extracción.
2. Sección de la labor.
3. Fragmentación.
4. Peso específico.
5. Diseño final del Draw points

**Figura 9**

*Elipsoide de extracción*

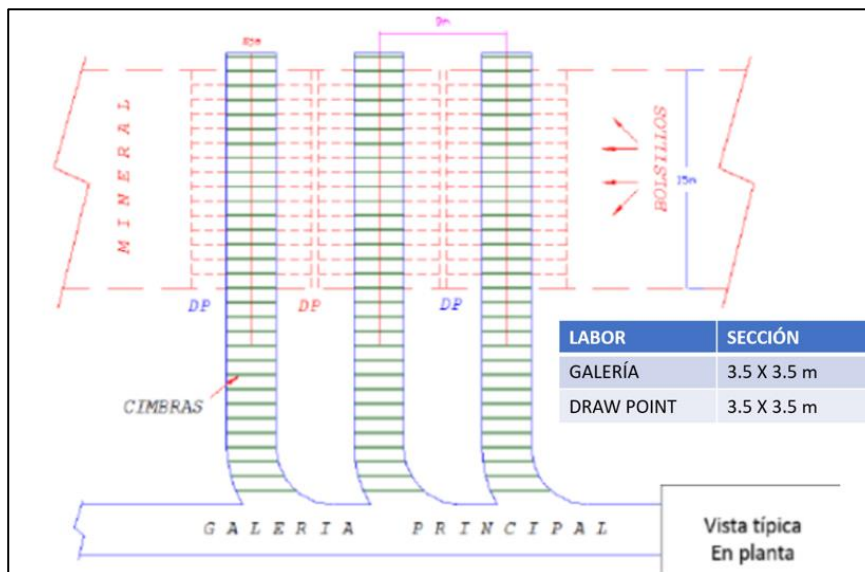


Fuente: Departamento de planeamiento.

Los resultados de diseño geométrico de minado deberán permitir planificar las operaciones unitarias y secuencia de minado del sistema de explotación con mejores estándares de operación y de esta manera maximizar la producción, mejorar los procesos de minado e influir en la reducción de los costos de preparación y desarrollos.

**Figura 10**

*Diseño de draw point*



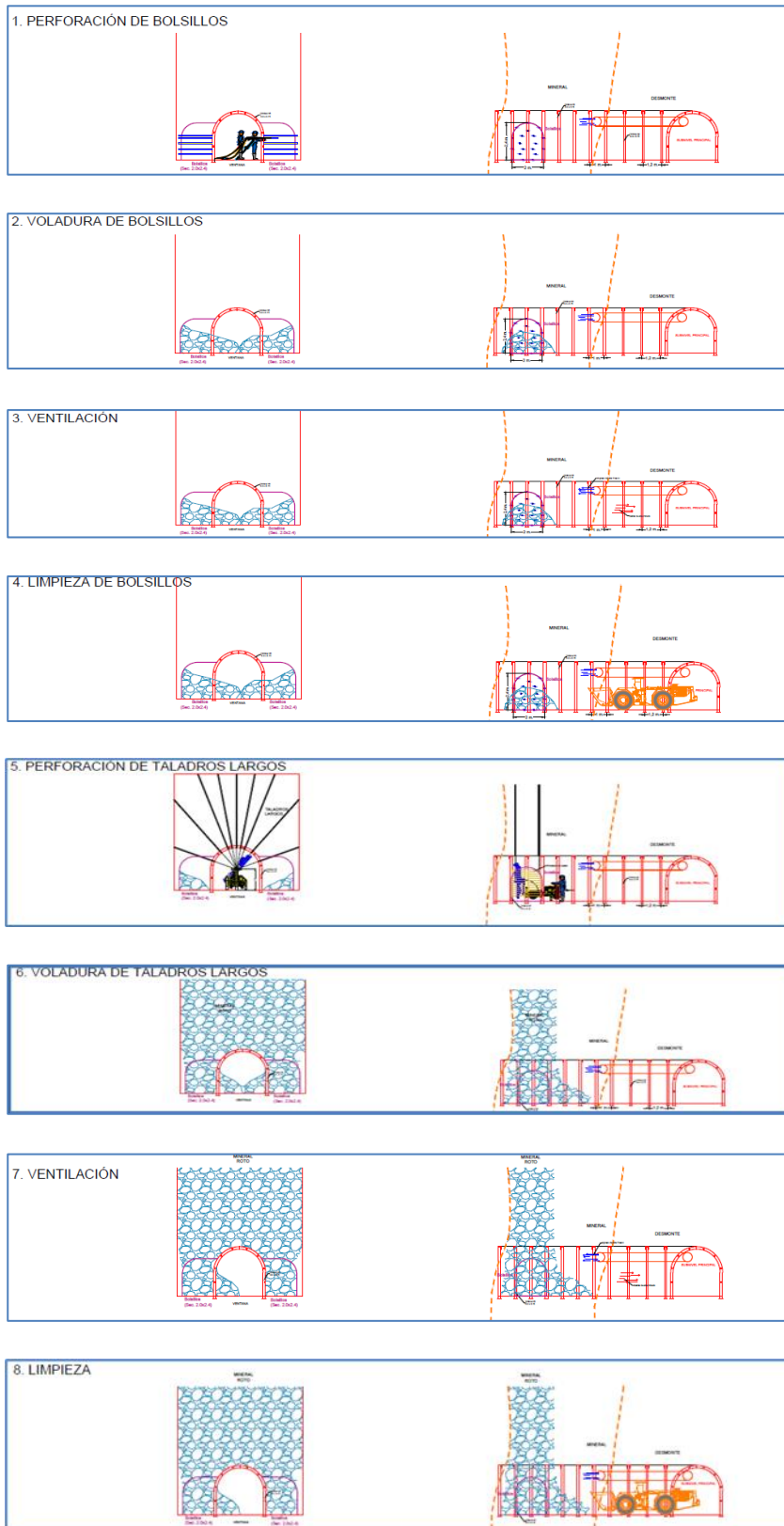
Fuente: Departamento de planeamiento.

### 1.2.9.2. Ciclo de minado Sublevel Caving

La particularidad de mina Yauricocha es que ejecutan “bolsillos” tal como se observa en el esquema inicial del ciclo de minado en Sublevel Caving de la figura 10, esta perforación y voladura de bolsillos nos permitirá generar cara libre para la liberación de energía al momento de realizar la voladura de los taladros largos, además de que el mineral caerá por gravedad por los bolsillos se hará más sencillo la limpieza de la carga acumulada.

# Figura 11

## Ciclo de minado – Sublevel Caving



Fuente: Departamento de Planeamiento.

### **1.3. Formulación del problema**

#### **1.3.1. Problema general**

¿Cómo influye la interpretación del monitoreo de cable TDR en el control del cono de subsidencia del Cuerpo Esperanza en la U.M. Yauricocha?

#### **1.3.2. Problemas específicos**

- a) ¿De qué manera la interpretación del monitoreo de cable TDR se relaciona con los esfuerzos inducidos por el método de minado de Sublevel Caving del Cuerpo Esperanza en la U.M. Yauricocha?
- b) ¿Cómo la interpretación del monitoreo de cable TDR influye en los aspectos de seguridad en la gestión de riesgos geotécnicos del Cuerpo Esperanza en la U.M. Yauricocha?

### **1.4. Formulación de Objetivos**

#### **1.4.1. Objetivo general**

Interpretar el monitoreo de cable TDR para el control del cono de subsidencia del Cuerpo Esperanza en la U.M. Yauricocha.

#### **1.4.2. Objetivos específicos**

- a) Realizar la interpretación del monitoreo de cable TDR para relacionarlo con los esfuerzos inducidos por el método de minado de Sublevel Caving del Cuerpo Esperanza en la U.M. Yauricocha.
- b) Interpretar los datos del monitoreo de cable TDR para la toma de decisiones en aspectos de seguridad en la gestión de riesgos geotécnicos del Cuerpo Esperanza en la U.M. Yauricocha.

### **1.5. Justificación de la investigación**

Debido a la profundización de la actividad minera en Yauricocha, se tiene actualmente una profundidad de 940m que afectan en la estabilidad de las

excavaciones por la gran cantidad de esfuerzos tanto verticales y laterales, además se sabe que el método aplicado en Yauricocha es el Sublevel Caving lo cual origina la subsidencia, por lo tanto, se justifica la interpretación del monitoreo de cable TDR por el problema presente.

#### **1.5.1. Justificación Teórica**

Teniendo en cuenta la información del estudio, el cable TDR (Reflectómetro de Dominio del Tiempo) es un instrumento electrónico usado para monitoreo el ascenso de la bóveda del cono de subsidencia el cual está instalada en la superficie en proyección al Cuerpo Esperanza, desde hace varios años la mina presenta problemas en las ventanas de explotación donde se aplica el método de minado Sublevel Caving puesto que la carga saturada es liberada a gran fuerza el cual es de muy alto riesgo para los trabajadores y equipos expuestos, los controles que se tienen son: Alarmas, taladros de drenaje, cámaras de alerta, cámara de vigía, etc. Los controles mencionados son de gran ayuda para evacuar a las personas expuestas en los tajeos pero no había un control para prevenir este tipo de fenómenos, por lo tanto la complejidad en el proceso de explotación de las estructuras mineralizadas de Yauricocha obligan a implementar mejoras tecnológicas con el fin de prevenir con anticipación la ocurrencia de estos eventos.

#### **1.5.2. Justificación Práctica**

Ante la filtración del agua subterránea por las discontinuidades del intrusivo, esta se traslada hacia el cuerpo mineralizado Esperanza producto del desplome de las cajas a causa de la aplicación del método de minado por hundimiento, el cual se satura en alto grado ya que este mineral es de baja competencia (Roca mala a muy mala calidad), se evidencia la inestabilidad en las

ventanas de explotación cuya sección es de 3.5 x 3.5 sostenidas con cimbras espaciadas a 1 metro, lo que ocurre es que al estar saturado el Cuerpo Esperanza este busca liberar toda la carga rompiendo así ese límite líquido, generando esta liberación en las ventanas. Frente a ese problema se implementó el monitoreo de cable TDR que al ser detectado la rotura o defecto puede prevenir con anticipación que la carga será liberada.

#### **1.6. Limitaciones de la investigación**

El presente trabajo de investigación que trata acerca de instrumentación geotécnica aplicado en minería subterránea es muy poco aplicado y estudiado en la minería peruana, debido a que el cable TDR (Reflectómetro de dominio del tiempo) es un instrumento electrónico mayormente usado en minería superficial, además no se encuentran antecedentes a nivel trabajos de tesis con respecto a este tema en aplicación de subsidencia.

La poca información que cuenta la empresa minera puesto que este control se ha implementado hace pocos meses, por lo tanto, este trabajo ayuda a mejorar la interpretación del monitoreo de la subsidencia.



## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Antecedentes de estudio**

##### **2.1.1. Antecedentes Nacionales**

- a) Zanabria, M. (2021). En su investigación titulado “Evaluación de la subsidencia inducida por la extracción de mineral para determinar la estabilidad del pique Mascota y Central en la U.M Yauricocha” (tesis de pre grado), de tal manera que su objetivo fue evaluar la subsidencia inducida por el minado con el fin de determinar la estabilidad de los piques, la investigación es científico – experimental cuyas muestras son los piques (labores subterráneas), teniendo como resultado que el pique mascota y central tienen un desplazamiento de entre 20-23 centímetros provocado por la subsidencia, el tesista llega a la conclusión que la mina Yauricocha cumple con los estándares de la industria y puede estimar o predecir condiciones a largo plazo en la mina.

- b) Soto, A. (2018). El tesista en su investigación “Estudio geomecánico y dimensionamiento de minado del cuerpo Esperanza de mina Yauricocha” (tesis de pregrado), cuyo objetivo de investigación fue definir el método más seguro y estable para minar el cuerpo Esperanza, para ello ha analizado los aspectos geomecánicos de la zona de interés, caracterización del macizo rocoso. La investigación es de tipo descriptiva y explicativa, teniendo como población al Cuerpo Esperanza y muestra al block de mineral probados y probables. Finalmente los resultados del tesista es que la calidad del macizo rocoso en el Cuerpo Esperanza en calizas va desde Regular A (IIIA – RMR 51-60) y en zona de intrusivo y mineral hasta Mala B (IVB RMR 21-30) evaluado según el criterio de Bieniawski (1989), por lo tanto el estudioso recomienda el método de minado de Corte y Relleno Ascendente dando más énfasis al método de Sub Level Caving, el último mencionado se deberá sostener con cimbras metálicas y realizar taladros largos para minar de subnivel a subnivel generando una elipsoide finalmente uno de los problemas es la formación de la subsidencia es por ello que se relaciona con la presente investigación.
- c) Acuña, P. (2018). La tesista investigó en la unidad minera Yauricocha el cuerpo mineralizado Angelita entre los niveles 820 y 920 ha enfrentado desafíos operativos. El método Sublevel Caving utilizado no ha cumplido con las expectativas de producción, resultando en altos costos operativos y baja eficiencia. Para abordar estos problemas, la tesista propuso mejorar el método Sublevel Caving en

un área específica de la mina. Tras una evaluación exhaustiva, se implementó ajustes en el diseño y la operación. Los resultados fueron alentadores en un aumento del 33.33% en la producción de mineral, una reducción del 2.4% en el costo operativo y mejoras en la eficiencia de las operaciones. La adquisición de equipos modernos también contribuyó a esta mejora. En conclusión, la implementación del método Sublevel Caving mejorado ha demostrado ser una solución efectiva para aumentar la productividad y reducir costos en la explotación minera de la unidad.

### **2.1.2. Antecedentes Internacionales**

- a) Wimmer & Ouchterlony, (2008). En su estudio de la reflectometría en el dominio del tiempo (TDR) en el ámbito minero ha sido fundamental para la gestión efectiva de las operaciones de caving en minas de bloques y subniveles. Ellos determinan que, en el pasado reciente, se ha observado un creciente interés en la utilización de la TDR para monitorear la iniciación y el progreso de la zona de caving, así como para evaluar el efecto del caving en la fracturación de la masa rocosa. Este enfoque ha permitido a los operadores ajustar la producción de acuerdo con la velocidad de caving y tomar medidas correctivas para fomentar el caving en áreas estancadas. Sin embargo, se ha señalado una limitada aplicación del TDR en minas de caving por subniveles, lo que destaca la necesidad de investigaciones adicionales en este campo. En este contexto, se destaca la importancia de examinar de manera más detallada las conclusiones obtenidas de estos estudios, especialmente en lo que respecta a la relación no lineal

entre el coeficiente de reflexión y el desplazamiento real de cizallamiento, la influencia del ángulo de cizallamiento en la respuesta de TDR y el efecto de la longitud del cable en las mediciones de TDR. Este antecedente sienta las bases para la investigación presente, que tiene como objetivo ampliar nuestra comprensión de la interpretación y aplicación del TDR en la unidad minera para mejorar la gestión y seguridad de sus operaciones mineras.

- b)** Puentes, I. (2021). El tesista en su investigación “Modelamiento de Esfuerzos Verticales a Través de Autómatas Celulares en Minería De Block/Panel Caving” tiene como propósito calibrar y validar experimentalmente este modelo numérico, particularmente en lo que respecta a la geometría de la zona de movimiento y la distribución de esfuerzos verticales. Una vez validado, el modelo se calibra con datos obtenidos de modelos físicos de block/panel caving, permitiendo replicar con precisión los resultados obtenidos en dichos modelos físicos. Esta validación es esencial para garantizar la fiabilidad y precisión del modelo numérico en la predicción del comportamiento de la sobrecarga en condiciones reales de explotación minera. Los resultados de la investigación muestran que el modelo numérico presenta una buena concordancia con los datos obtenidos de los modelos físicos, aunque se identifican diferencias significativas en ciertos aspectos, como los esfuerzos verticales iniciales. Se proponen estrategias para reducir estas discrepancias, como un análisis más detallado de las ecuaciones utilizadas en el modelo, especialmente en

relación con los parámetros de fricción entre partículas y paredes del modelo. A pesar de las dificultades identificadas, se concluye que el modelo numérico basado en autómatas celulares presenta un potencial prometedor como herramienta de análisis para la estimación de esfuerzos verticales en operaciones de caving. Su simplicidad y rapidez lo convierten en una herramienta flexible y de fácil implementación, lo que lo hace adecuado para adaptarse a las necesidades específicas de cada usuario en el campo de la minería subterránea.

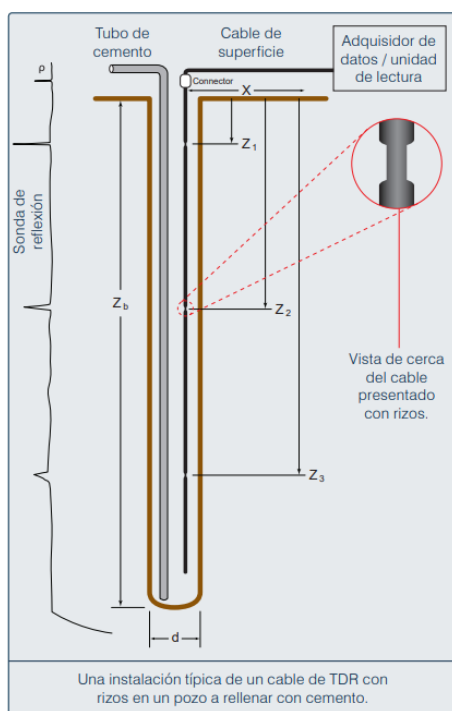
## **2.2. Bases teóricas – científicas**

### **2.2.1. Reflectómetro de dominio del tiempo (TDR)**

El reflectómetro de dominio del tiempo, es un instrumento económico y simple de detectar e interpretar las deformaciones, anomalías, variaciones y respuesta del macizo rocoso o suelo, utilizado en minería subterránea y minería superficial por medio del uso de dos cables coaxiales cementados en taladros o pozos. El TDR implica la instalación de un cable coaxial en un pozo lleno de cemento que tiene condiciones iguales a las condiciones existentes de la masa rocosa o suelo.

## Figura 12

### Instalación típica de un cable TDR



Fuente: RST instruments, (2019).

Una unidad de ensayo de cable TDR se emplea para generar un pulso de voltaje a lo largo del cable y recibir las reflexiones, dichas reflexiones se generan por la deformación que sufre la roca, abrasiones, daños del cable. Al ocurrir el movimiento, las reflexiones a lo largo del cable cambian tal como el cable se deforma, este monitoreo se puede realizar de manera remota desde un ordenador o computadora e incluso desde el celular y también se puede monitorear mediante data logger en campo, este último se conecta el cable directamente al equipo data logger y se muestra el gráfico del estado del cable, ubica las anomalías que podría sufrir el cable a lo largo de su longitud, cumple con las siguientes características.

- Cable coaxial.
- Alimentación 12 volt.
- Salida de voltaje de 0 a 10 volt.

- Consumo de corriente 10 mA
- Rango de temperatura -40 a +85 °C
- Diámetro del cable: 0.5'' (1.27 cm)
- Sistema de transmisión de data (telemetría)
- Vida útil del cable de 15 a 20 años
- Vida útil de la batería del equipo insitu (7 años, depende de la frecuencia de monitoreo).

**Figura 13**

*Data logger en monitoreo de cable TDR*



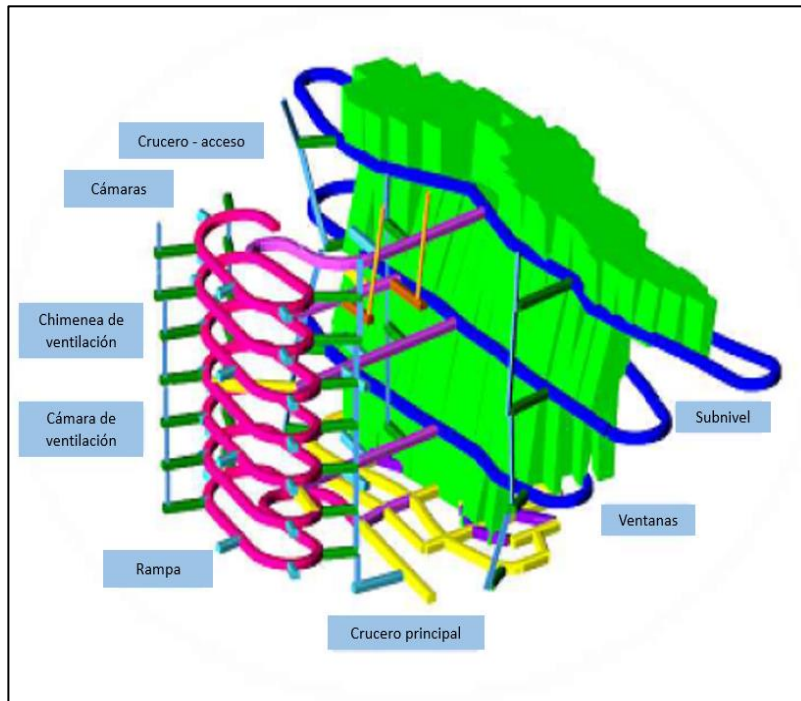
Fuente: AEA Technology, Inc., (2022)

### **2.2.2. Hundimiento por subniveles “Sublevel Caving”**

Método de explotación subterráneo utilizado para extraer minerales masivos a gran escala, implica la ejecución de subniveles cercano a la estructura mineralizada y posterior a ellos labores de explotación en el mineral para luego fragmentar el mineral con taladros largo y hacer que caigan por gravedad

**Figura 14**

*Diseño Sublevel Caving*



Fuente: Redco Consultants.

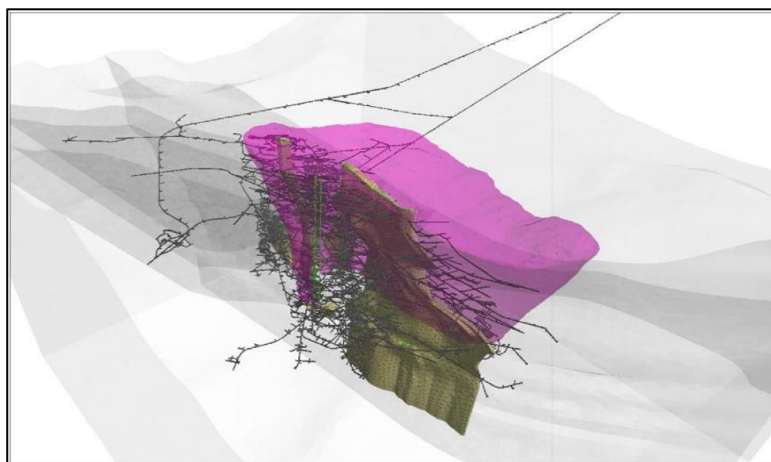
**2.2.3. Cono de subsidencia**

Es aquel fenómeno tal como dice el nombre que forma un cono provocado por la misma explotación del Sub level caving dentro de la minería, mientras más se va profundizando y minando (extracción de mineral sin rellenar) el cono se hace más grande y la superficie se ve más afectada generando un cráter dependiendo al avance y a la explotación masiva.



## Figura 15

*Vista tridimensional del modelo de subsidencia*



Fuente: DCR Ingenieros S.R.Ltda., (2019)

### **2.2.4. Cable TDR en método de minado por Hundimiento de subniveles**

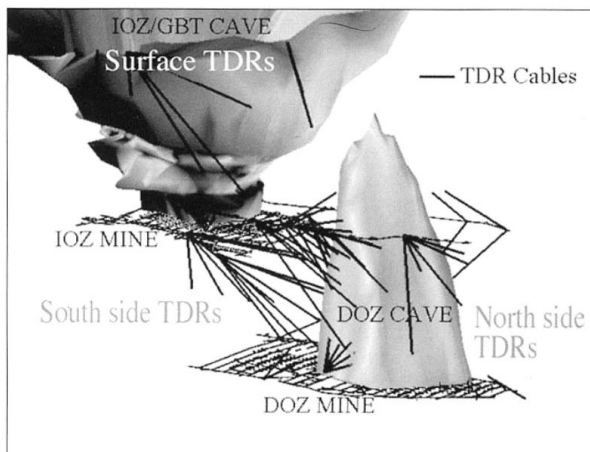
Para mantener una operación minera exitosa en términos de producción y seguridad, es necesario comprender el comportamiento del macizo rocoso bajo las condiciones de hundimiento, por lo tanto, el monitoreo de cable TDR es necesario el cual nos proporcionará información sobre el inicio, propagación, velocidad del ascenso de la bóveda de la cavidad, el monitoreo es esencial y muy útil hoy en día. Una de las primeras aplicaciones de TDR en el monitoreo de la deformación de masas rocosas en minas de hundimiento fue realizada por Panek & Tesch (1981). Se llevaron a cabo varios experimentos en los cuales se instalaron cables coaxiales tanto en barrenos perforados en las paredes y techos, como colocados en el piso de una galería cubiertos por mortero. Estos cables se utilizaron para detectar el avance externo de la fracturación alrededor de un bloque minero separado mientras era subextraído y colapsado en el nivel inferior. Aunque se documentaron cambios en las formas de onda del TDR, la correlación entre la respuesta de la masa rocosa y la deformación del cable se limitó a

localizar fracturas importantes en la roca, que se desarrollaron a medida que avanzaba el hundimiento O'Connor & Wade (1994). La ubicación de las fracturas visibles observadas en el mortero permitió comparar la apertura y el desplazamiento de cizalladura con las reflexiones de TDR recibidas a lo largo del cable.

Se realizaron grandes esfuerzos para avanzar en el monitoreo del crecimiento de la cavidad utilizando TDR, ya que se instalaron numerosos cables de TDR (por ejemplo, en las minas DOZ, Northparkes y Palabora) de manera similar a un abanico desde varias estaciones para cubrir un área grande, ver Figura 16. Esto permite, además de la verificación del inicio del hundimiento, una determinación precisa de la forma tridimensional real de la zona de hundimiento, es decir, la propagación horizontal y vertical, así como los efectos del hundimiento en la fracturación de la masa rocosa Szwedzicki et al, (2004).

### **Figura 16**

*Vista tridimensional de los cables TDR ubicados alrededor de los conos*



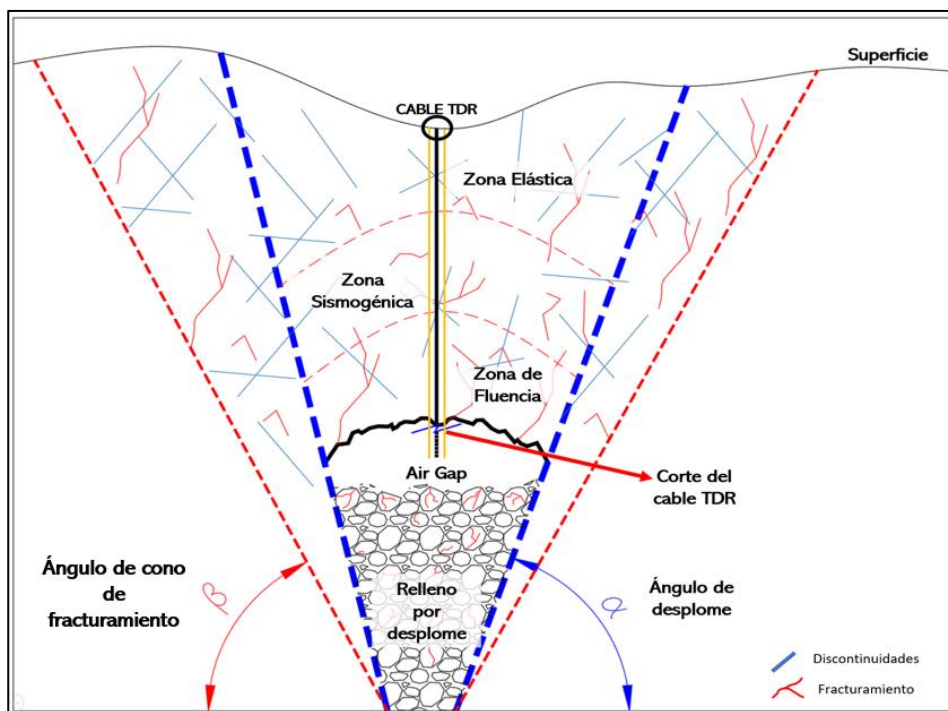
Fuente: Szwedzicki et al, (2004).

El cable TDR (Time Domain Reflectometry) es empleado en minería subterránea sobre todo en las cuáles se aplica o aplicó algún método de minado por Hundimiento, entre ellos tenemos los más conocidos al método Sublevel

Caving y Block Caving, el propósito principal es el de monitorear la formación y cambios del cono de subsidencia con respecto al avance del minado masivo, monitorea las deformaciones, movimientos, el ascenso de la bóveda, el ancho del cono, etc. Estos movimientos, deformaciones e incluso cortes en los cables coaxiales cambia la capacitancia del cable y provoca reflejos de los pulsos de voltaje y que, a través de una conversión, estos valores proporcionan una medida de longitud el cual te permite saber el punto exacto en el cual se tiene cambios en el macizo rocoso.

**Figura 17**

*Estructura interna del caving con instalación del cable TDR*



Fuente: Elaboración propia.

### 2.2.5. Teoría del Elipsoide en hundimiento por subniveles

Kvapil, R. (1992). El Sublevel Caving es un método de minado masivo basado en la utilización del flujo por gravedad de la roca de mineral volado y

desmante hundido. Como todos los métodos de minado, se tienen ventajas y desventajas que deben ser evaluados en el diseño de la mina y el planeamiento, las dimensiones, ancho y alto de las labores subterráneas, la geometría de la estructura mineralizada se debe tomar en cuenta de manera vital. Se sabe que el SLC es un método por hundimiento, Kvpil interpretó la formación de una elipse de desprendimiento y otra de extracción (Ver figura 18). Kvpil planteó el modelo matemático para calcular el semi-ancho del elipsoide de desprendimiento,  $bN$ . Si se conoce el volumen del material extraído,  $VN$ , y la altura del elipsoide,  $hN$ , el valor de  $bN$  se podría calcular usando la ecuación:

$$bN = \sqrt{\left(\frac{VN}{2.094hN}\right)}$$

Por lo tanto, concluyó que los elipsoides de desprendimiento y extracción tienen la misma forma, lo que significa que comparten la misma excentricidad. El material situado entre estos elipsoides se aflojará y desplazará, pero no alcanzará el punto de descarga. Este material está caracterizado por el factor de pérdida  $\alpha$ , definido como:

$$\alpha = \frac{EG}{EG - EN}$$

Donde  $EG$  representa el volumen del límite del elipsoide de extracción, y  $EN$  es el volumen del elipsoide en movimiento. El valor de  $\alpha$  varía entre 1.066 y 1.100. Kvpil señaló que en la mayoría de los materiales granulares,  $\alpha$  tiende a acercarse a la cifra con valores más bajos, llegando hasta 1.066. Si aplicamos esta cifra a la ecuación anterior, obtenemos:

$$EG \approx 15EN$$

Esto implica que el volumen del límite del elipsoide es aproximadamente 15 veces mayor que el volumen del elipsoide en movimiento. Por lo tanto, la altura del elipsoide límite puede aproximarse como:

$$hG \approx 2.5hN$$

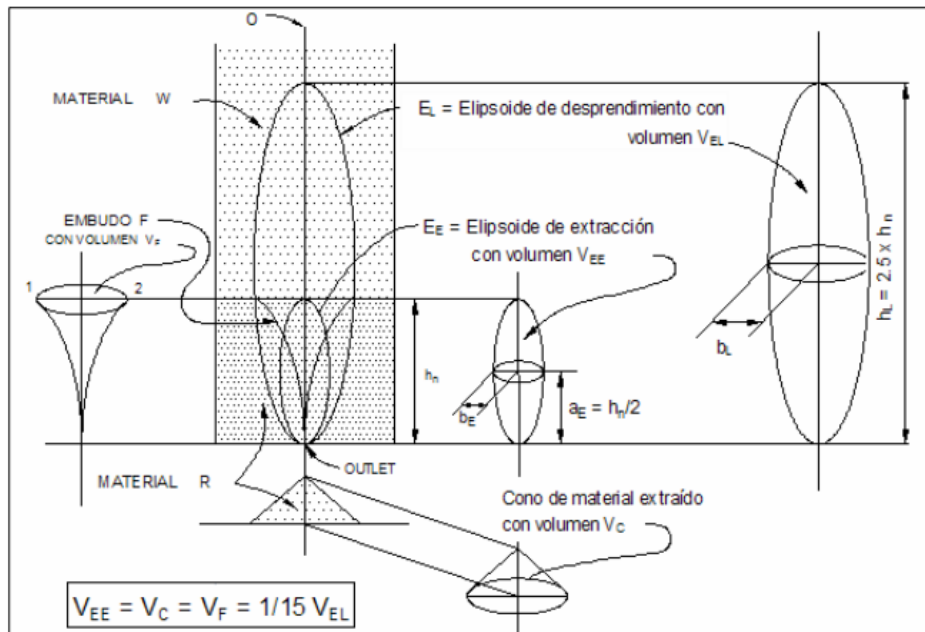
Poco tiempo después, en 1966, Janelid y Kvapil ampliaron el estudio del flujo por gravedad y la formación de elipsoides idealizados para una mina de mineral de hierro a gran escala en Suecia que utilizaba el Sublevel Caving como método de explotación. Kvapil inicialmente utilizó modelos 2D a pequeña escala; su trabajo resultó ser significativo y se empleó como herramienta de diseño. Kvapil concluyó que la distancia entre las aberturas debe ser igual o menor que el ancho del flujo móvil o el ancho del elipsoide en movimiento. La mina “El Teniente”, con la ayuda de Kvapil, extendió esta teoría para calcular el espaciamiento entre los puntos de extracción (S).

$$S = 2bN + wa$$

Donde  $wa$  representa el ancho efectivo del drawpoint o tajeo, es decir, el ancho de la carga del mineral roto en el drawpoint. Se asumió que  $wa$  es aproximadamente el 75% del ancho del drawpoint. A partir de esto, es evidente que el espaciamiento debe ser al menos igual al ancho del elipsoide del movimiento.

**Figura 18**

*Teoría del Elipsoide*

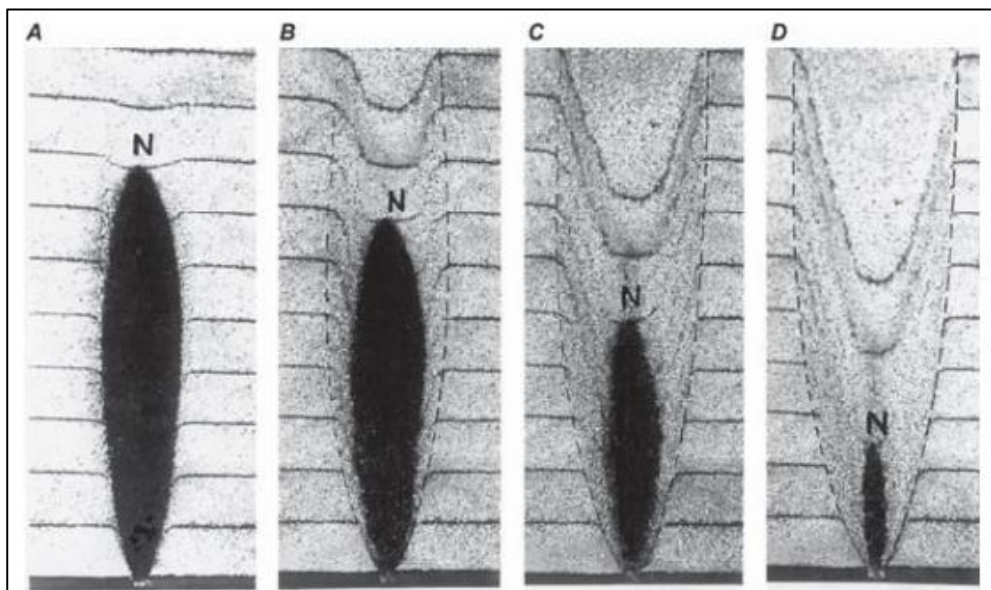


Fuente: Kvapil (1992).

En la figura 19 se representa la formación del elipsoide conforme avanza la explotación, donde el color negro simboliza el mineral que está siendo extraído.

**Figura 19**

*Simulación típica que muestra la elipse dibujada.*

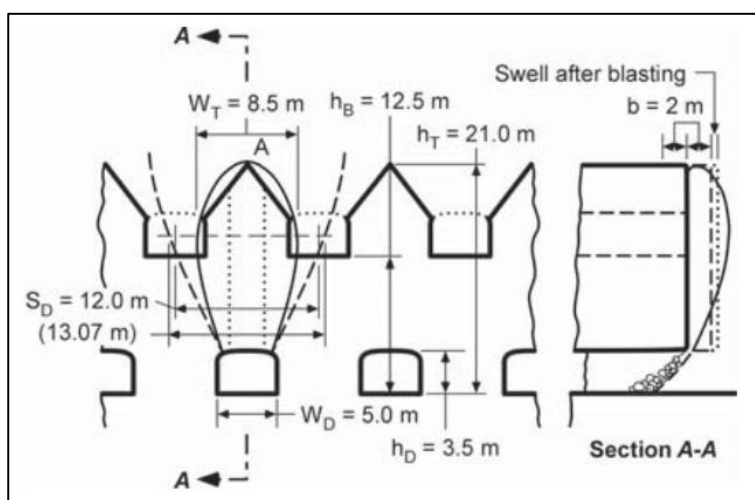


Fuente: Hustrulid & Rudolf, (2008).

A continuación, se presentan los parámetros considerados en el diseño de los drawpoints en el método de minado Sublevel Caving, junto con los cálculos del elipsoide con el objetivo de recuperar el mineral en su totalidad a medida que se profundiza. Estos parámetros fueron establecidos por Kvapil.

**Figura 20**

*Diseño en los drawpoints en Sublevel Caving*



Fuente: Hustrulid & Rudolf, (2008)

**Tabla 2**

*Parámetros geométricos para considerar en el diseño de Sublevel Caving*

PARÁMETROS		
Descripción	Unidad	Parámetros
Altura máxima del elipsoide	m	Ht
Espaciamiento entre galerías (eje a eje)	m	SD
Altura del subnivel	m	HS
Ancho de punto de extracción	m	WD
Altura de punto de extracción	m	HD
Ancho total del elipsoide de extracción	m	WT
Ancho $W'$ en función a la altura total del elipsoide de extracción Ht.	m	$W'$
Ancho efectivo de extracción	m	a

Fuente: Departamento de geomecánica – SMCSA.

### 2.2.6. Flujo Gravitacional y granulometría del mineral

Se entiende por flujo gravitacional de roca como un método de hundimiento al proceso, a través del que el material se mueve desde su posición inicial hasta los puntos de extracción, a medida que va siendo extraído debido a la gravedad. La granulometría del mineral se ocupa del análisis y la descripción de cómo se distribuyen los tamaños de las partículas dentro de un mineral o una mineralización, este aspecto es fundamental para estimar el crecimiento del cono de subsidencia.

### 2.2.7. Efectos de debilitamiento por hundimiento por subniveles

Duplancic & Brady, (1999). En las minas en las cuáles se aplica un método de minado por hundimiento se debe construir un modelo conceptual de propagación de hundimiento, donde se va a tener que diferenciar por 4 zonas:

- **Zona elástica:** Esta región muestra un comportamiento lineal-elástico. Los esfuerzos presentes están por debajo del umbral de daño, lo que permite que el macizo rocoso permanezca sin sufrir daños significativos.
- **Zona sísmica:** El macizo rocoso se ve afectado por deslizamientos a lo largo de discontinuidades existentes y la propagación de nuevas fracturas, lo que genera actividad sísmica. En esta zona, los esfuerzos ya han superado el umbral de daño.
- **Zona de fluencia:** El macizo rocoso sufre un daño significativo debido a la redistribución de los esfuerzos, lo que resulta en una pérdida parcial o total de su resistencia, especialmente en términos de cohesión y tracción.
- **Vacío de aire:** Se trata de una zona vacía generada en función del volumen o la tasa de extracción. Esta zona solo existe si el macizo rocoso en la zona

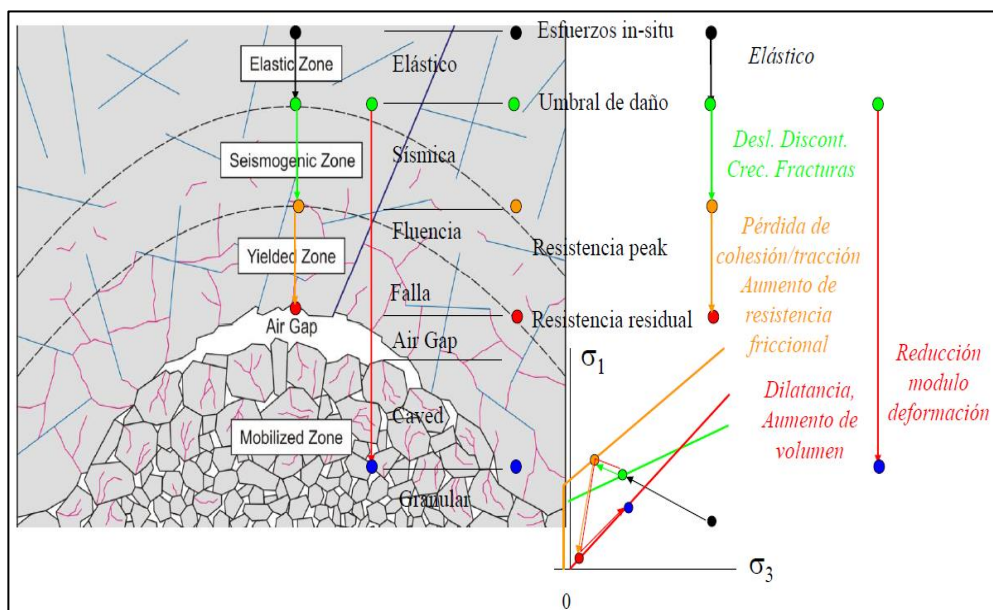


de fluencia aún retiene cierta resistencia en términos de cohesión y tracción, permitiendo la formación de un área de roca suspendida sobre ella.

- **Zona hundida:** Esta zona está formada por los bloques que han caído del "cave-back". Estos bloques, a su vez, proporcionan soporte a las paredes de la cavidad.

**Figura 21**

*Modelo conceptual de propagación del hundimiento.*



Fuente: GMT, (2015)

La propagación del hundimiento es explicada por tres mecanismos principales. Brown, E. (2007)

- **Gravitacional (gravity caving):** Si los esfuerzos confinantes son bajos, los bloques del macizo rocoso pueden caer debido a la gravedad o deslizarse a través de estructuras inclinadas.
- **Esfuerzos (stress caving):** Este fenómeno se produce principalmente debido a esfuerzos compresivos. Si los esfuerzos inducidos en el cave-back son elevados en comparación con la resistencia del macizo rocoso y la resistencia al corte de las estructuras presentes, puede ocurrir el fracturamiento del

macizo rocoso y el deslizamiento a través de estructuras, fallas y contactos, entre otros.

- **Extensión horizontal (subsidence caving):** Este mecanismo generalmente ocurre cuando existen cavidades mineras adyacentes que han eliminado el confinamiento lateral de esfuerzos del bloque que será hundido, es decir, cuando el frente de hundimiento avanza desde una zona previamente hundida.

**Tabla 3**

*Evolución del cave-back y mecanismos de propagación*

	<p>El corte inicial define una excavación tabular que induce el hundimiento por efecto de viga, siendo el mecanismo fundamentalmente gravitacional.</p>
	<p>La geometría del techo de la cavidad comienza a curvarse, lo que aumenta la importancia del mecanismo por esfuerzos.</p>
	<p>La propagación continua del hundimiento aumenta la curvatura del techo de la cavidad, destacando el efecto del mecanismo por esfuerzos.</p>



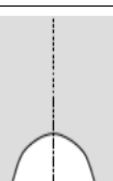
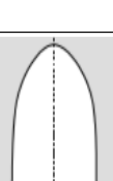
Fuente: Flores, G. (2005) obtenida de GMT, (2015).

### 2.2.8. Condiciones de esfuerzos en excavaciones subterráneas

La evaluación del estado de esfuerzos, antes y durante la explotación del yacimiento minero, resulta de fundamental importancia, debido a que los esfuerzos inducidos pueden dar origen a las concentraciones de esfuerzos que causan la inestabilidad local y global del macizo rocoso. Para ello es necesario delimitar, en un modelo geomecánico, las zonas con potencial influencia de esfuerzos inducidos, ya sea por el efecto de la profundidad o la influencia de esfuerzos de pre minado elevados; asimismo, se debe verificar la capacidad de acumulación y liberación de energía del macizo rocoso.

**Tabla 4**

*Condición de esfuerzos en la cavidad*

Situación	hc/b	Condición de Esfuerzos	
		CASO $\sigma_H/\sigma_v = 0.33$	CASO $\sigma_H/\sigma_v = 3$
	≤ 0.050	EN APROXIMADAMENTE EL 70% DEL TECHO DE LA EXCAVACION EN SU PARTE CENTRAL, SE PRODUCEN ESFUERZOS DE TRACCION CON UNA DISTRIBUCION PRACTICAMENTE UNIFORME Y UNA MAGNITUD DE ORDEN DEL 70% DEL ESFUERZO VERTICAL IN SITU. ESTO FAVORECE LA RUPTURA O QUIEBRE DEL MACIZO ROCOSO Y LA APERTURA DE LAS ESTRUCTURAS GEOLOGICAS. EN LOS EXTREMOS DE LA CAVIDAD SE PRODUCE CONCENTRACIONES DE ESFUERZOS DE COMPRESION QUE EXCEDEN EN MÁS DE 10 VECES LA MAGNITUD DEL ESFUERZO VERTICAL IN SITU. ESTO FAVORECE LA RUPTURA POR CORTE DEL MACIZO ROCOSO.	NO SE PRODUCEN ESFUERZOS DE TRACCION EN EL TECHO DE LA EXCAVACION. EN APROXIMADAMENTE DEL 70% DE ESTE TECHO EN SU PARTE CENTRAL SE PRODUCEN ESFUERZOS DE COMPRESION CON UNA DISTRIBUCION PRACTICAMENTE UNIFORME Y UNA MAGNITUD DEL ORDEN DEL 50% DEL ESFUERZO VERTICAL IN SITU Y LA RUPTURA O QUIEBRE DEL MACIZO ROCOSO Y LA APERTURA DE LAS ESTRUCTURAS GEOLOGICAS. EN LOS EXTREMOS DE LA CAVIDAD SE PRODUCEN CONCENTRACIONES DE ESFUERZOS DE COMPRESION QUE EXCEDEN EN MAS DE 10 VECES LA MAGNITUD DEL ESFUERZO VERTICAL IN SITU ESTO FAVORECE LA RUPTURA POR CORTE DEL MACIZO ROCOSO.
	0.167	EN APROXIMADAMENTE EL 50 % DEL TECHO DE LA EXCAVACION EN SU PARTE CENTRAL, SE PRODUCEN ESFUERZOS DE TRACCION, CON UNA DISTRIBUCION PRACTICAMENTE UNIFORME Y UNA MAGNITUD DEL ORDEN DE 40 % DEL ESFUERZO VERTICAL INSITU ESTO FAVORECE LA RUPTURA O QUIEBRE DEL MACIZO ROCOSO Y LA APERTURA DE LAS ESTRUCTURAS GEOLOGICAS. EN LOS EXTREMOS DE LA CAVIDAD SE PRODUCEN CONCENTRACIONES DE ESFUERZOS DE COMPRESION QUE EXCEDEN EN MAS DE 5 VECES LA MAGNITUD DEL ESFUERZO VERTICAL IN SITU. ESTO FAVORECE LA RUPTURA POR CORTE DEL MACIZO ROCOSO.	SE PRODUCE UNA DISTRIBUCION CASI UNIFORME DE ESFUERZO DE COMPRESION A LO LARGO DEL TECHO DE LA CAVIDAD, CON UNA MAGNITUD DEL ORDEN 1.3 VECES EL ESFUERZO VERTICAL INSITU. NO SE PRODUCEN CONCENTRACIONES DE ESFUERZOS EN LOS EXTREMOS DE LA CAVIDAD. ESTA CONDICION DIFICULTA LA RUPTURA DEL MACIZO ROCOSO EN EL TECHO DE LA CAVIDAD Y HACE DIFCIL QUE LA CAVIDAD SIGA PROPAGANDOCE POR LO QUE LA CAVIDAD TENDERA HACER ESTABLE SI NO SE AUMENTA LA EXTENSION BASAL DE LA EXCAVACION
	0.5	NO SE PRODUCEN TRACCIONES EN EL TECHO DE LA EXCAVACION. LOS ESFUERZOS DE COMPRESION SON MINIMO EN EL CENTRO DEL TECHO, CON UNA MAGNITUD NULA O MUY BAJA, Y MAXIMOS EN LOS EXTREMOS DE LA CAVIDADA, DONDE ALCANZAN UNA MAGNITUD DE ORDEN DE 3 VECES EL ESFUERZO VERTICAL INSITU. ESTA CONDICION NO FAVORECE LA RUPTURA DEL MACIZO ROCOSO EN EL TECHO DE LA CAVIDAD Y SOLO PUEDEN PRODUCIRSE RUPTURAS POR CORTE EN LAS ZONAS EXTREMAS SI Y SOLO SI SE EXCEDE LA RESISTENCIA EN COMPRESION UNIAIXIAL DEL MACIZO ROCOSO (EN EL CASO DE LA ROCA SECUNDARIA ESTA RESISTENCIA PUEDE SER DEL 10% AL 30% DE LA RESISTENCIA DE LA ROCA INTACTA, MIENTRAS QUE LA ROCA PRIMARIA PUEDE ALCANZAR DEL 40% AL 70% DE LA RESISTENCIA DE LA ROCA INTACTA).	NO SE PRODUCEN TRACCIONES EN EL TECHO DE LA EXCAVACION. NO SE PRODUCEN CONCENTRACIONES DE ESFUERZOS DE COMPRESION EN LOS EXTREMOS DE LA CAVIDAD. EN EL CONTORNO DE LA CAVIDAD SE PRODUCE UNA DISTRIBUCION DE ESFUERZOS DE COMPRESION QUE ALCANZA UN MAXIMO, DEL ORDEN DE 3 VECES EL ESFUERZO VERTICAL IN SITU, EN EL CENTRO DEL TECHO Y PRESENTA MINIMO, DE MAGNITUD NULA O MUY BAJA, EN LOS EXTREMOS DE LA CAVIDADA. ESTA CONDICION NO FAVORECE EL PROGRESO DEL CAVING Y TIENDE A GENERAR UNA CAVIDAD ESTABLE.
	1.5	SE PRODUCE UNA DISTRIBUCION CASI UNIFORME DE ESFUERZO DE COMPRESION A LO LARGO DEL TECHO DE LA CAVIDAD, CON UNA MAGNITUD DEL ORDEN 1.3 VECES EL ESFUERZO VERTICAL INSITU. NO SE PRODUCEN CONCENTRACIONES DE ESFUERZOS EN LOS EXTREMOS DE LA CAVIDAD. ESTA CONDICION DIFICULTA LA RUPTURA DEL MACIZO ROCOSO EN EL TECHO DE LA CAVIDAD Y HACE DIFCIL QUE LA CAVIDAD SIGA PROPAGANDOCE POR LO QUE LA CAVIDAD TENDERA HACER ESTABLE SI NO SE AUMENTA LA EXTENSION BASAL DE LA EXCAVACION	NO SE PRODUCEN TRACCIONES EN EL TECHO DE LA EXCAVACION, PERO SI EN SUS EXTREMOS. EN EL ENTORNO DE LA CAVIDAD SE PRODUCE UNA DISTRIBUCION DE ESFUERZOS DE COMPRESION QUE ALCANZA UN MAXIMO, DEL ORDEN DE 6 VECES EL ESFUERZO VERTICAL INSITU, EN EL CENTRO DEL TECHO Y PRESENTA MINIMOS, CON TRACCIONES DEL ORDEN DEL 50% DE LA MAGNITUD DELESFUERZO VERTICAL IN SITU, EN LOS EXTREMOS DE LA CAVIDAD. ESTA CONDICION NO FAVORECE EL PROGRESO DEL CAVING, PERO SI FAVORECE LA OCURRENCIA DE RUPTURAS POR TRACCION EN LOS EXTREMOS DE LA CAVIDAD Y/O POR CORTE DE LA PARTE CENTRAL DEL TECCHO

Fuente: Cárcama Bernt, (2016).

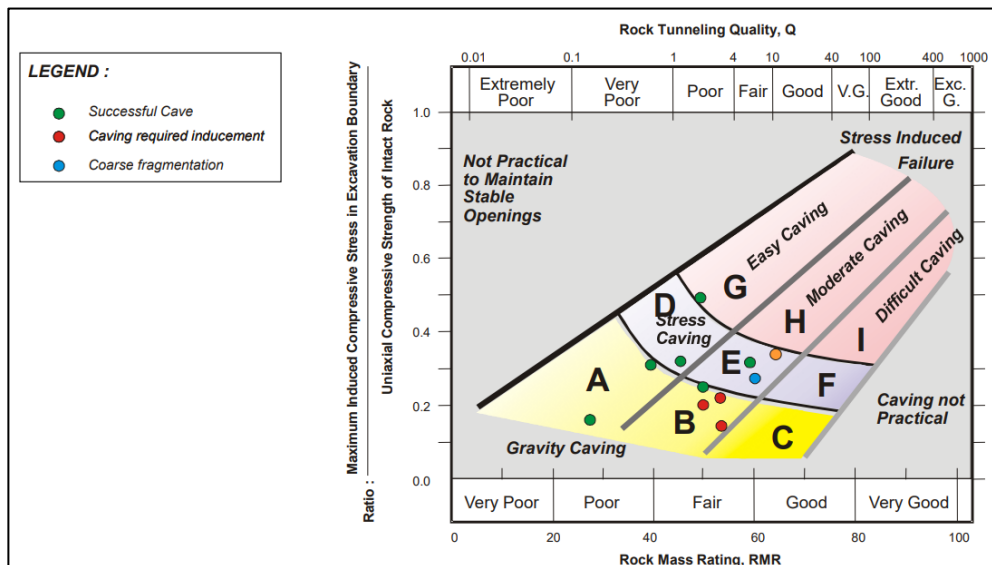
### 2.2.9. Ábacos empíricos para la generación del hundimiento

Los modelos empíricos que evalúan la susceptibilidad al hundimiento del macizo rocoso se basan en la calidad de la roca, las estructuras presentes, la condición de esfuerzos, las dimensiones de la excavación y los casos históricos documentados.

La figura 22 muestra los diversos mecanismos de propagación del hundimiento según la relación entre el máximo esfuerzo tangencial inducido en el cave-back y la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) del macizo. Esto demuestra cómo la condición de esfuerzos influye en el mecanismo de propagación del hundimiento.

**Figura 22**

*Ábaco empírico para cuantificar el mecanismo de hundimiento*



Fuente: Cárcama Bernt, (2016)

### 2.2.10. Sistema de monitoreo geotécnico

Un sistema de monitoreo geotécnico es un conjunto de herramientas y técnicas diseñadas para supervisar y analizar las condiciones del terreno y las estructuras durante las operaciones mineras, el objetivo de contar con un sistema

de monitoreo es gestionar riesgos geotécnicos, garantizar la seguridad y la estabilidad de los componentes monitoreados, dependiendo a las condiciones de la mina y los riesgos potenciales se incorpora un sistema de monitoreo que es preferible que sea en tiempo real para generar alertas tempranas. Los explicados en la presente investigación son: Monitoreo Cable TDR (longitud del cable insertado en el subsuelo), monitoreo microsísmico (detecta eventos sísmicos a nivel subterráneo y monitoreo mediante Interferometría (monitoreo satelital con comparaciones de imágenes).

### **Figura 23**

*Sistema de monitoreo geotécnico en tiempo real*



Fuente: Solutions, (s.f)

#### **2.2.11. Gestión de riesgos geotécnicos**

La gestión de riesgos geotécnicos en la minería implica identificar, evaluar, controlar y reducir los riesgos relacionados con las condiciones geológicas y geotécnicas en las actividades mineras. Este proceso es esencial para asegurar la seguridad de los trabajadores, mantener la estabilidad de las instalaciones y optimizar la operación de la mina. Para ello se debe tener en cuenta

una secuencia de etapas para el entendimiento geotécnico los cuáles son: Recolección de información, modelos geotécnicos, análisis de los datos, implementación y seguimiento constante a los riesgos encontrados mediante la aplicación de controles.

#### **2.2.12. Deformación del macizo rocoso y convergencia**

Cuando se realiza una excavación subterránea, como un túnel o una galería, el macizo rocoso experimenta un cambio en el estado de esfuerzos que inicialmente se encontraba en equilibrio. Esta perturbación provoca la redistribución de esos esfuerzos, lo que lleva a la deformación de la roca que rodea la excavación.

- **Deformación elástica:** Se da cuando la roca tiene altos valores de elasticidad y que dado esa característica tiene la capacidad de regresar a su forma original si se eliminan los esfuerzos.
- **Deformación plástica:** Se da cuando los esfuerzos superan la resistencia de la roca y puede producirse una deformación plástica o permanente, donde la roca no recupera su forma original.

La convergencia en excavaciones subterráneas se refiere al cierre gradual de las paredes de estas. Esto sucede cuando las tensiones en la roca que rodea la labor se redistribuyen hacia el interior de la excavación, haciendo que las paredes y el techo se muevan hacia el centro del vacío creado.

#### **2.2.13. Modelamiento numérico geotécnico**

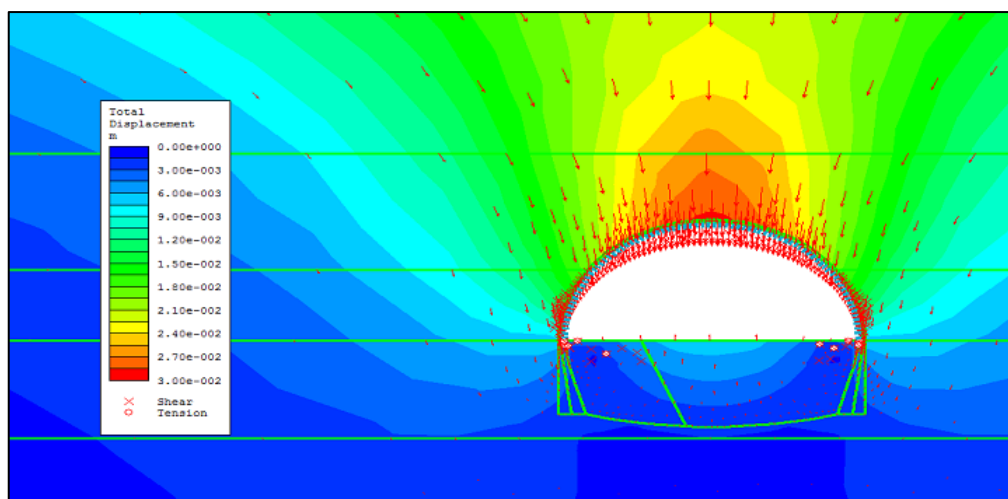
Es un modelo que refleja la realidad de la mina, se simula en un programa de cómputo y los resultados deberían ser muy similares a las condiciones actuales de la mina en aspectos geotécnicos, dicho modelo debe tener la capacidad de

predecir eventos futuros, por lo tanto, para la construcción de un modelo numérico es importante tener como mínimo la siguiente información:

- Modelo geológico
- Modelo de cavidades y subsidencia
- Modelo estructural
- Modelo geométrico

### Figura 24

*Modelamiento numérico de una excavación*



Fuente: Ingeoexpert, (s.f)

## 2.3. Definición de términos básicos

En el presente trabajo de investigación se mencionarán diferentes términos básicos cuyo concepto será resumido a continuación:

### 2.3.1. Subsidencia

Hundimiento del terreno como resultado de la extracción o remoción del mineral que durante la explotación estos espacios vacíos no fueron rellenados.

### 2.3.2. Estructura mineralizada

Formación geológica, distribución o disposición de minerales debajo de la superficie terrestre que puede o no tener valor económico.

### **2.3.3. Geotecnia**

Es el estudio de los diferentes materiales geológicos y su comportamiento mecánico en el contexto en la minería.

### **2.3.4. Geomecánica**

La geomecánica estudia el comportamiento del macizo rocoso y el suelo y esto implica el estudio de sus propiedades y esfuerzos que interactúan en ellos.

### **2.3.5. Discontinuidad**

Cambio o interrupción en la masa rocosa, se podría definir también como una anomalía en la formación de las rocas al estar expuestas a altas presiones.

### **2.3.6. Macizo rocoso**

Un macizo rocoso es la roca propiamente dicha, pero dentro de ellas con formaciones de discontinuidades.

### **2.3.7. Esfuerzos en mecánica de rocas**

Se refiere a la fuerza aplicada por unidad de área sobre un material rocoso.

### **2.3.8. Cable coaxial**

Un cable coaxial es un tipo de cable empleado para la transmisión de señales eléctricas de alta frecuencia y datos.

### **2.3.9. Instrumentación geotécnica**

Uso de diferentes instrumentos y equipos para monitorear y/o medir las propiedades, el comportamiento, el estado de las rocas y suelos.

### **2.3.10. Crown Pillar**

Se refiere a la parte de la roca que se encuentra encima de un depósito mineral o una cavidad subterránea después de la extracción minera.

### **2.3.11. Mining Rock Mass Rating (MRMR)**



Es un sistema geomecánico empleado en la industria minera para valorar la calidad y la resistencia del macizo rocoso en entornos subterráneos.

### **2.3.12. Radio hidráulico**

Se refiere a la relación entre el área y el perímetro de una superficie.

## **2.4. Formulación de Hipótesis**

### **2.4.1. Hipótesis general**

La interpretación del monitoreo de cable TDR influye directamente en el control del cono de subsidencia del Cuerpo Esperanza en la U.M. Yauricocha.

### **2.4.2. Hipótesis específicas**

- a) La interpretación del monitoreo de cable TDR tiene relación directa con los esfuerzos inducidos por el método de minado de Sublevel Caving del Cuerpo Esperanza en la U.M. Yauricocha.
- b) Con la interpretación del monitoreo de cable TDR, se toma decisiones efectivas en aspectos de seguridad en la gestión de riesgos geotécnicos del Cuerpo Esperanza en la U.M. Yauricocha.

## **2.5. Identificación de Variables**

### **2.5.1. Variable independiente**

- X = Interpretación del monitoreo de cable TDR.

### **2.5.2. Variable dependiente**

- Y = Control del cono de subsidencia.

## **2.6. Definición Operacional de variables e indicadores**

Con el fin de analizar las variables de la investigación, es necesario conocer los resultados del estudio de los indicadores considerados. Para ello, se detallan a continuación los resultados del estudio de los indicadores considerados.

## Cuadro 2

### *Variables e indicadores de operación*

TIPO DE VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	
Variable Independiente  X = Interpretación del monitoreo de cable TDR.	Se interpreta el monitoreo de cable TDR para prever y controlar el ascenso de la bóveda del cono de subsidencia, advirtiendo de colapsos inesperados o no deseados. El cable TDR localiza defectos y/o cambios en cables metálicos. O'Connor & Wade, (1994).	La variable se evaluará las mediciones con el análisis de la variación de la longitud a lo largo del tiempo del cable TDR. Se dará con el uso del datalogger y software.	X1 = Características del cable TDR.	Diámetro.	pulgadas
				Vida útil del cable TDR.	años
				Sistema transmisión de data.	adimensional
Variable dependiente  Y = Control del cono de subsidencia	El cono de subsidencia es una depresión en la superficie del terreno que se forma como resultado de la extracción de la mineralización. Szwedzicki, Widijanto, & Sinaga, (2004).	La variable incluye un sistema de alerta en caso el cable TDR presente anomalías, así mismo se realizará un análisis de esfuerzos y estabilidad del cono de subsidencia mediante caracterización de la masa rocosa y modelamiento.	X2 = Sistema de monitoreo y variación de la longitud del Cable TDR insertado en el Cuerpo Esperanza de la U.M. Yauricocha.	Longitud del cable TDR.	metros
			X3 = Tiempo de monitoreo del Cable TDR insertado en el Cuerpo Esperanza de la U.M. Yauricocha.	Tiempo de monitoreo hasta la variación de la longitud del cable TDR.	horas
			Y1 = Ascenso de la bóveda del cono de subsidencia	Estudio geomecánico y modelamiento numérico para estimar esfuerzos inducidos.	MPa
			deformaciones en las excavaciones.	milímetros	
			Y2 = Aspectos de seguridad en la gestión de riesgos.	Alertas de seguridad.	Rangos de criticidad – niveles

Fuente: Elaboración propia.

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN**

#### **3.1. Tipo de investigación**

La investigación es de naturaleza cuantitativa porque se centró en la recolección y análisis de datos numéricos. Además, es de tipo aplicativo, ya que se llevó a cabo una gestión de riesgos geotécnicos. Por último, es de tipo explicativo, dado que se esclareció las causas de los eventos o comportamientos observados y entender cómo se relacionan las diferentes variables.

#### **3.2. Nivel de investigación**

Corresponde al nivel aplicado debido a su enfoque en la gestión de riesgos y la resolución de problemas prácticos, mientras que también incorporó elementos explicativos al analizar las causas y relaciones entre variables.

#### **3.3. Métodos de investigación**

El método de investigación que se aplicó en el estudio fue la de influencia y relación debido a que permitió analizar y explicar cómo es que las diferentes variables interconectaron y cómo la variable afectó a la otra.

### **3.4. Diseño de investigación**

El diseño de investigación utilizado fue correlacional, porque aludió a la interpretación del monitoreo de cable TDR en el cono de subsidencia del cuerpo mineralizado Esperanza sin tener que manipular estas variables.

### **3.5. Población y muestra**

#### **3.5.1. Población**

La presente investigación tuvo como población a toda el área superficial y subterránea afectada por el cono de subsidencia de la Unidad Minera Yauricocha.

#### **3.5.2. Muestra**

La zona de influencia de monitoreo de cable TDR en proyección a las labores subterráneas activas del Cuerpo Esperanza que fue explotado por el método Sublevel Caving.

### **3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

Las diferentes técnicas utilizadas en el presente trabajo de investigación fueron las siguientes:

#### **3.6.1. La observación directa**

Esta técnica fue utilizada en el monitoreo en campo, monitoreo con data remota, con inspecciones en campo y como la explotación de la estructura mineralizada forma el cono de subsidencia.

#### **3.6.2. Monitoreo**

La técnica consistió en verificar el estado del cable TDR insertado en el macizo rocoso ya sea con monitoreo remoto y/o monitoreo en campo, así mismo se verificó los diferentes monitoreos geotécnicos implementados en la unidad minera.

### **3.6.3. Cuaderno de apuntes**

Esta técnica nos permitió realizar diferentes anotaciones del estado del cable TDR para el control del cono de subsidencia.

### **3.6.4. Reportes**

Mediante el monitoreo remoto, los datos se almacenaron de manera diaria, a partir de ellos se contó con data histórica y se reportó de manera diaria y semanal.

## **3.7. Técnicas de procesamiento y análisis de datos**

Las técnicas de procesamiento en la realización de esta investigación fueron obtenidas con el monitoreo de data remota y/o monitoreo en campo, para el análisis de datos se utilizó el Microsoft Excel en la que se dio uso de tablas y gráficos dinámicos. Para cumplir con el objetivo se analizó el cuerpo mineralizado esperanza y se procesaron los datos en softwares como AutoCAD, deswik CAD, leapfrog, dips y RS2.

## **3.8. Tratamiento Estadístico**

Para la validación de la hipótesis de la investigación, se aplicó el análisis de la variación del parámetro de longitud mediante el modelo de comparaciones de promedio, debido a que los datos del monitoreo son en gran cantidad y del mismo valor (constante).

## **3.9. Orientación ética filosófica y epistémica**

El estudio planteado se realizó respetando la procedencia de la información externa utilizada, con las citas bibliográficas y de igual manera el desarrollo del marco teórico. Así mismo se puso todo el ímpetu y voluntad en la ejecución del estudio, siempre con el valor de la ética del profesional investigador.

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **4.1. Descripción del trabajo de campo**

Para una mejor y adecuada interpretación del monitoreo de cable TDR se explicó el funcionamiento del sistema de monitoreo y luego se realizó la caracterización geomecánica del Cuerpo Esperanza y de esta manera comprender más aún las condiciones y el comportamiento geomecánico que presenta el cuerpo que está siendo explotado por el método masivo de Hundimiento por Subniveles (SLC por sus siglas en inglés).

##### **4.1.1. Cable TDR**

La técnica T.D.R. (Time Domain Reflectometry), es una técnica de medición que se utiliza para determinar las características de un cable TDR mediante la observación de las ondas reflejadas y se puede utilizar para detectar deformaciones dentro del macizo rocoso, aplicado en la unidad minera en el método de Sub Level Caving con el propósito de interpretar el ascenso de la bóveda producido por el hundimiento.

#### 4.1.2. Instalación de cable TDR

Luego de ejecutado la perforación diamantina para el cable TDR 01 y 02, se siguen las siguientes indicaciones:

- Antes de iniciar los trabajos se da una breve charla al personal de perforación que apoyaran con la instalación del cable TDR.

#### Figura 25

*Charla de seguridad*



Fuente: Geosinergia.

- También se verifica la continuidad del cable a instalar, mediante el equipo E20/20 TDR.
- Luego mediante tubería de acero de 1' se procede a bajar el cable TDR, siendo la tubería la guía para el cable TDR; este procedimiento se realiza ajustando el cable hacia la tubería.

## **Figura 26**

### *Acople del cable y tubería*



Fuente: Geosinergia.

- El cable de 400 m se procede a unir con el de menor longitud mediante un acople y cinta galvanizada.

## **Figura 27**

### *Unión mediante cinta galvanizada*



Fuente: Geosinergia.

- Al finalizar el bajado de cable se inicia el proceso de inyección de lechada de cemento según el diseño de los especialistas de la Unidad Minera.



## Figura 28

### *Mezcla de lechada de cemento*



Fuente: Geosinergia.

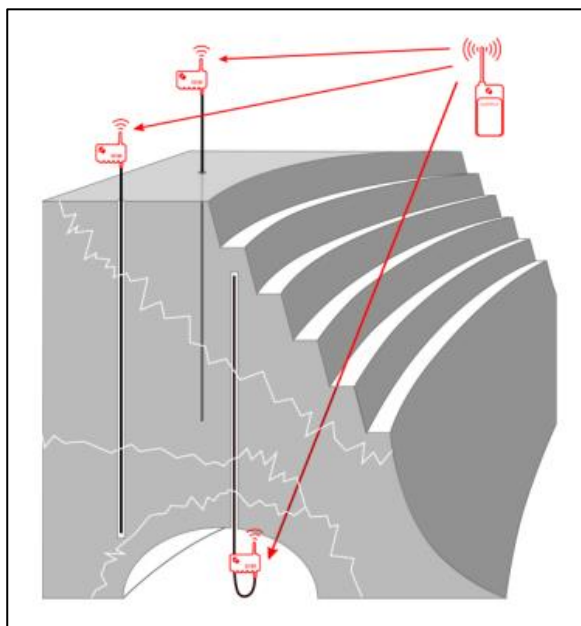
- Luego de culminar la inyección de lechada de cemento se procede a verificar la continuidad del cable y cortar a 1.5m del collar, dejando preparado para su posterior automatización.
- La profundidad final de los cables son los siguiente: TDR 01 (460 m) y TDR 02 (560m).

### **4.1.3. Funcionamiento del sistema**

El sistema SSTDR tiene como argumento de medición el mismo concepto que un TDR, inyectando una señal eléctrica y midiendo de manera electrónica y automática si ocurre un evento de “rebote”, calculando el tiempo transcurrido entre eventos y transformándolo en una señal analógica de voltaje, que es transmitida de forma inalámbrica hacia un concentrador de datos llamado Gateway, desde donde se podrá transformar a Unidades de Ingeniería, siendo metros para esta aplicación.

## Figura 29

*SSTDR enviando datos a una Gateway*



Fuente: Geosinergia

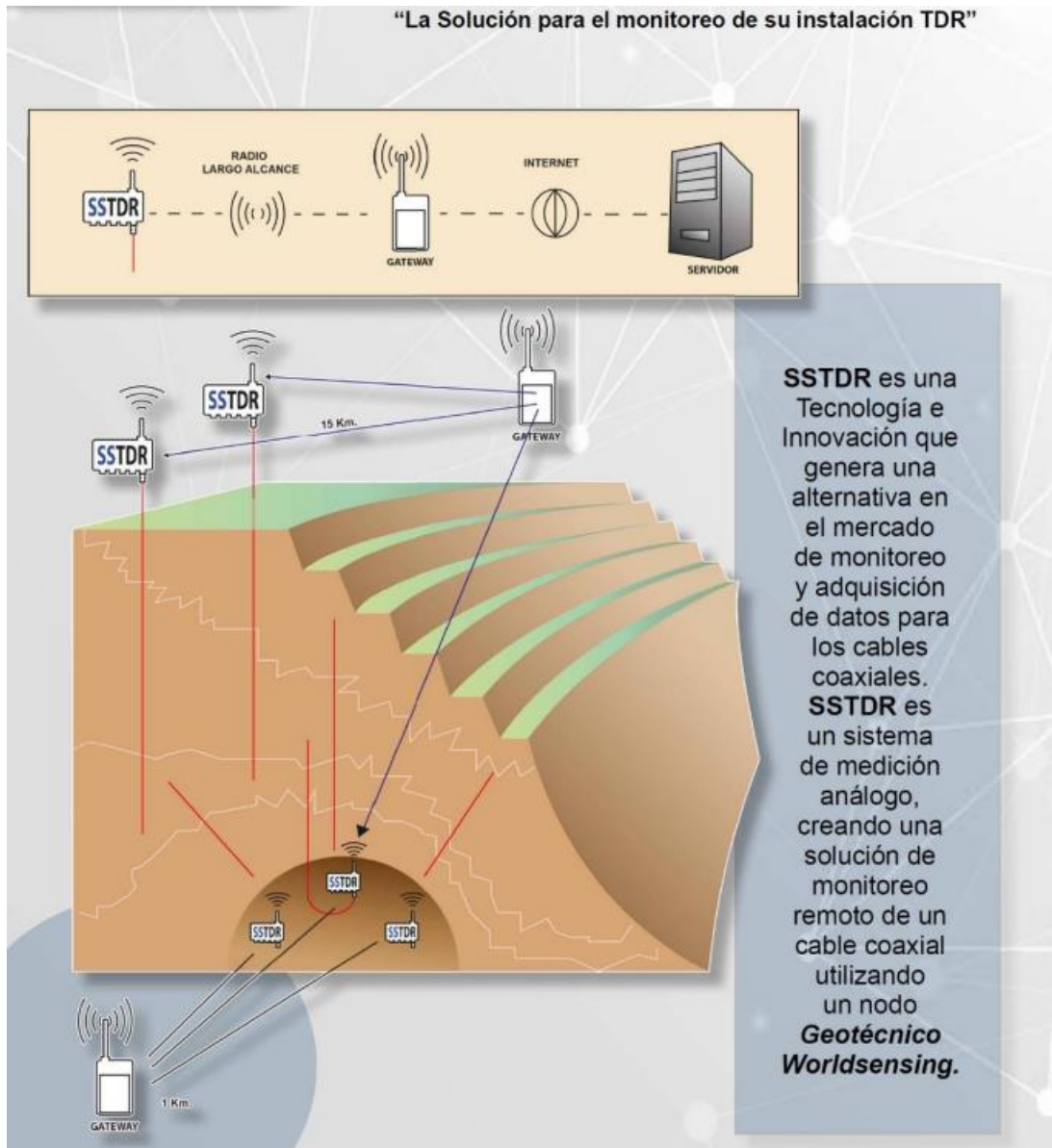
### 4.1.3.1. SSTDR

Para la automatización de lecturas de TDR, Geosinergia ha desarrollado un sistema único, el que aprovecha la tecnología del cable TDR para monitorear y registrar cuando se produce un corte de este tras un evento. El sistema SSTDR no reemplaza el sistema tradicional TDR, ya que se puede realizar un análisis de deformación se necesita la interpretación por un experto, indicadores como deformación temprana, obstrucción del cable, presencia de agua, etc. El sistema SSTDR ha sido diseñado para determinar la longitud del cable coaxial y poder generar alerta temprana a un corte del cable en el tiempo, a través de un monitoreo inalámbrico. Principio de funcionamiento del Sistema SSTDR: El SSTDR entrega un voltaje proporcional en volts al largo de un cable coaxial. La

escala de voltaje fluctúa entre 0 y 10 Volts, siendo 10 Volts el largo máximo para el que ha sido configurado por el usuario.

**Figura 30**

*Funcionamiento SSTDR*



Fuente: Geosinergia.

Parámetros para ingresar para conversión en unidades de ingeniería.

## Figura 31

### Interfaz monitoreo remoto

The screenshot shows the 'Engineering units' configuration page for Channel 1 in the LoadSensing interface. The page includes a navigation bar with 'Networks', 'Status', and 'Configuration' menus. The main content area is titled 'Engineering units' and shows the configuration for 'Channel 1'. A checkbox labeled 'Use engineering units' is checked. Below it is a dropdown menu set to 'Voltage'. A box contains the formula  $Y = (R_i - C)F$  with definitions: 'Y: Measured value in units' and 'R: Current reading in Volts'. Below the formula are three input fields: 'Units: Magnitude that is measuring the sensor (ie: mBars, mm)' with 'm', 'C: Constant or initial reading in volts' with '0.02', and 'F: Sensor factor in units/Volt' with '32.3'. A 'Save' button is at the bottom left.

Fuente: Geosinergia

Ecuación para conversión en unidades de ingeniería:

$$Y = (R_i - C)F$$

Donde:

- Y: Es el resultado expresado en metros.
- Ri: Es la lectura entregada por el SSTDR en volt
- C: Es el offset, que corrige los posibles errores de conversión de voltaje
- F: Es el factor de conversión
- $F = \frac{\Delta T \cdot v_p \cdot v_{luz}}{4 \cdot V_{cc}} = \Delta T \cdot v_p \cdot 7.57045$
- Vp: Velocidad de propagación de la luz en el cable
- ΔT: Periodo de calibración en fábrica en  $\mu s$

Ecuación para estimación de longitud de cable TDR: Longitud de monitoreo

$$L_{TDR} = L_R - L_C$$

Donde:

- LR: Longitud de registro
- LTDR: Longitud de cable TDR
- LC: Longitud cable conexión (Latiguillo 1 m)

#### **4.1.4. Gateway concentrador de datos**

Loadsensing se compone de dispositivos inalámbricos y una suite de software. Todas las unidades de hardware son compatibles con la mayoría de los sensores geotécnicos. Una vez que los sensores están conectados a la unidad de detección de carga inalámbrica y las puertas de enlace del sistema están correctamente instaladas en el sitio, están listas para recibir, almacenar y enviar datos. Al mismo tiempo, todos estos datos están disponibles a través de una interfaz web que permite a los usuarios monitorear el sitio o la infraestructura de forma remota. Durante el proceso de instalación de las unidades inalámbricas, una aplicación de Android permite a los clientes configurar y visualizar el rendimiento de cada dispositivo.

Pueden establecer tasas de muestreo, verificar la cobertura de radio donde se instalen las unidades y ver datos en tiempo real capturados por los sensores.

## Figura 32

### *Gateway – data remota*



Fuente: Geosinergia.

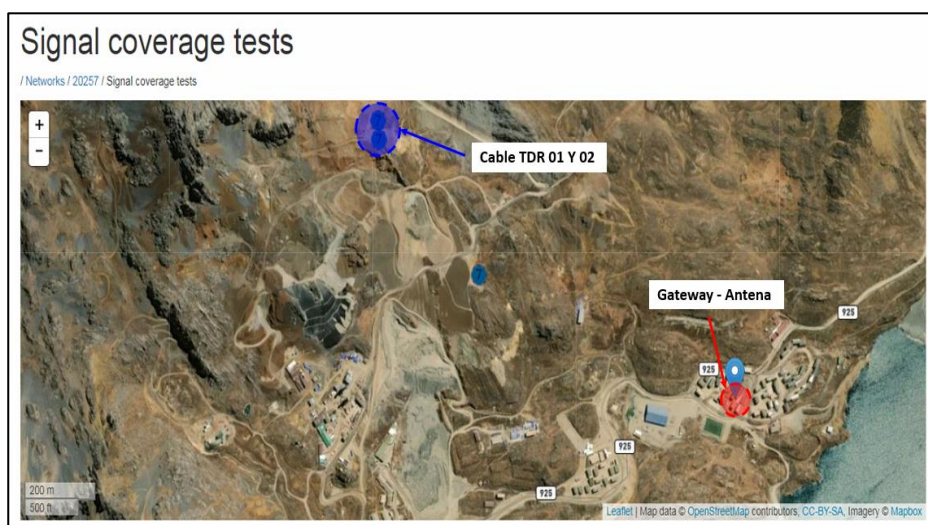
#### **4.1.5. Acceso al Gateway**

El Gateway ofrece la posibilidad de conexión local directa, utilizando el puerto USB interno del Gateway. Cuando se accede a través de este método, la conexión también se protege mediante https. Sin embargo, esta conexión le pedirá una contraseña que no es única (es la misma para todos los Gateway). Esto se hace teniendo en cuenta dos consideraciones importantes:

- Se necesita un método directo de recuperación de datos si se pierde la contraseña de acceso remoto.
- El acceso a la Gateway solo puede ser personal autorizado.
- La comunicación por radio de los Nodos al Gateway está encriptada con AES.
- Todas las comunicaciones remotas que permiten el acceso del usuario a los Gateway se realizan con protocolos https.

**Figura 33**

*Ubicación de cable TDR 01, 02 y antena Gateway*



Fuente: Elaboración propia.

**Cuadro 3**

*Condición inicial de instrumentación de cable TDR*

NODO ID	INSTRUMENTO ID	COORDENADAS PSAD 56		PRODUNDIDAD TDR (LTDR m)	LONGITUD DE CABLE DE CONEXIÓN (LC, m)	UBICACIÓN
		E	N			
8922	TDR-01	421370	8639001	460	1	C. Esperanza
8935	TDR-02	421370	8638961	560	1	C. Esperanza

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 34**

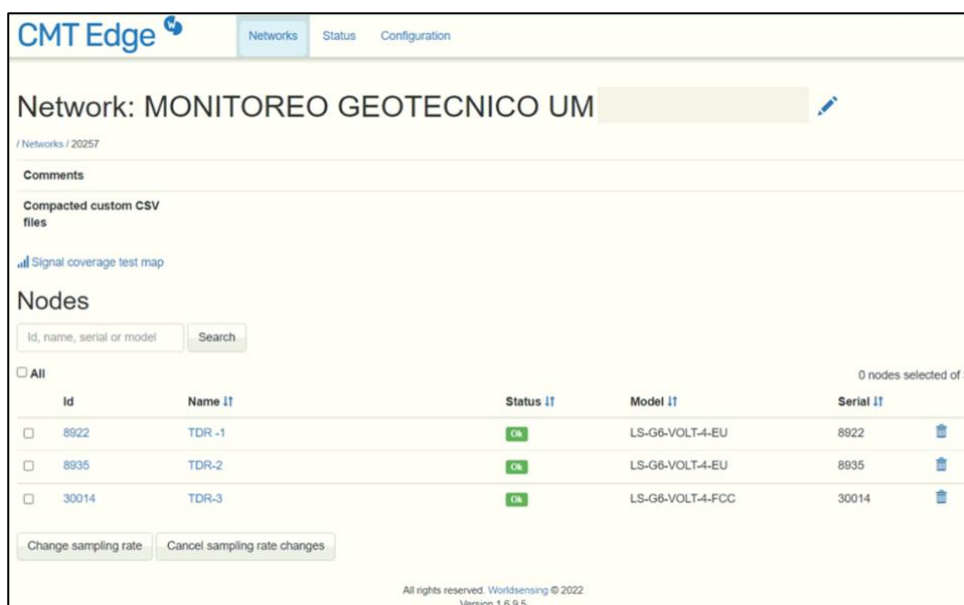
*Ubicación de TDR 01 y 02 – Google Earth*



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 35**

*Acceso a la Gateway – interfaz del monitoreo remoto*



Fuente: Geosinergia.

En la figura 35 se visualiza el interfaz donde se envían y guardan los monitoreos realizados de manera automática con una frecuencia de 2 horas, para mayor entendimiento a continuación se explicará el proceso de monitoreo de cable TDR.

#### **4.1.6. Proceso de monitoreo de Cable TDR**

Con la implementación del cable TDR para el control del cono de subsidencia de la unidad minera, se puede monitorear el estado del cable de dos maneras diferentes, los cuáles se detallan a continuación:



### Figura 36

#### *Monitoreo remoto y monitoreo en campo*



Fuente: Elaboración propia.

El cable TDR instalado en proyección del Cuerpo esperanza tiene conexión a internet mediante una antena que está conectada al cable TDR el cual se le conoce con el nombre de “Gateway”, gracias a esa antena y a la conexión a internet se puede monitorear de manera rápido simplemente ingresando a la dirección IP, debido a que el cono de subsidencia es un riesgo crítico en la unidad minera se optó por este tipo de sistema de monitoreo el cual ofrece datos cada cierto tiempo el cual es programable de acuerdo a la tendencia de rotura, para mayor entendimiento a continuación se explicará los pasos a seguir para realizar el monitoreo remoto:

- Ingresar a la plataforma de Google con la dirección IP.

### Figura 37

*Plataforma Google para ingreso al monitoreo remoto*

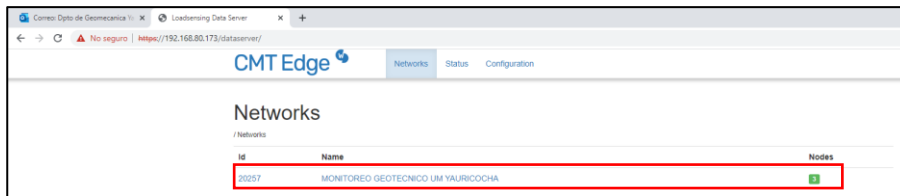


Fuente: Elaboración propia.

- Dar click en el botón de monitoreo.

### Figura 38

*Interfaz CMT Edge del monitoreo de TDR*

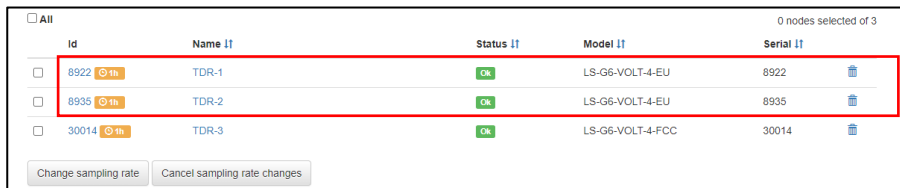


Fuente: Elaboración propia.

- Seleccionar el TDR que deseas visualizar (TDR 1 y TDR 2).

### Figura 39

*Menú de opciones TDR 1 y TDR 2*



Fuente: Elaboración propia.

- Descargar la data en el menú de visualización de datos.

**Figura 40**

*Visualización de la última lectura voltaje y longitud*

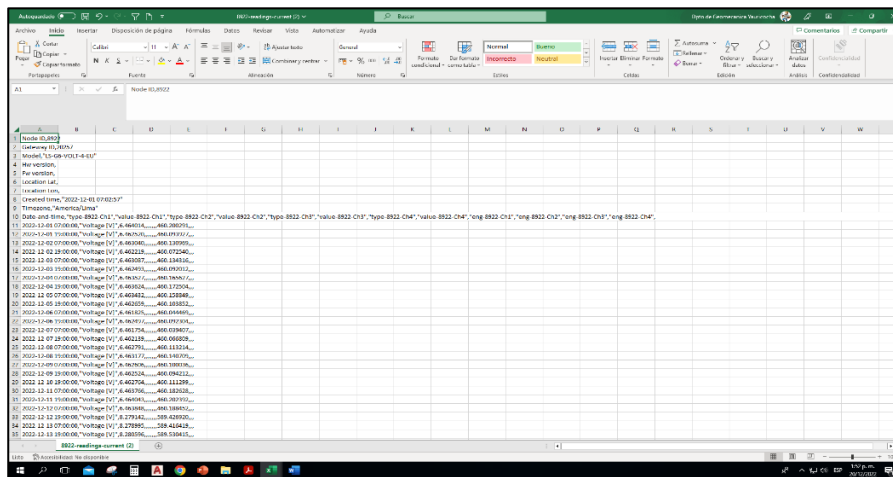


Fuente: Elaboración propia.

- En el interfaz de Excel, separar el texto en columnas.

**Figura 41**

*Datos compilados del mes descargados en formato csv*



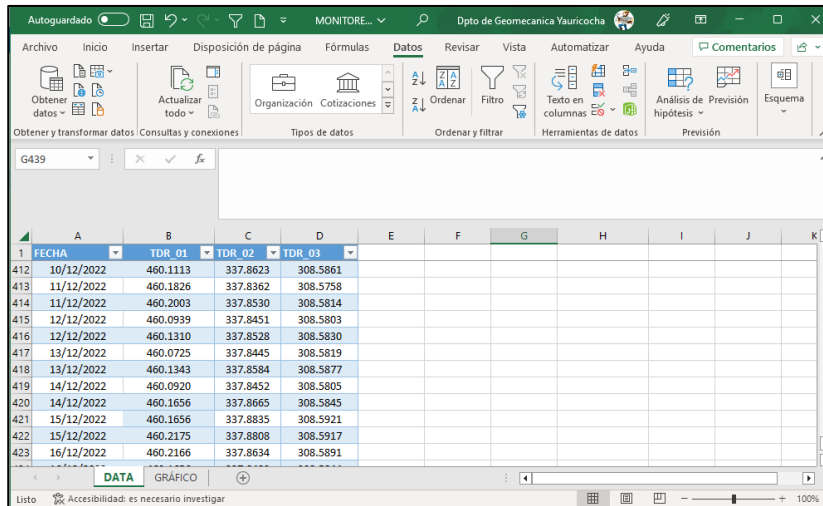
Fuente: Elaboración propia.

Tal como se observa en la figura 41, la data se descarga de la plataforma “CMT Edge” en formato csv (ejecutable con Microsoft Excel), se puede visualizar una gran cantidad de datos. El tiempo de monitoreo es programable y te puede dar datos con una frecuencia de hasta 30 segundos, por términos de vida útil del equipo y del histórico de cambios de longitud en los cables TDR la frecuencia de monitoreo es de 2 horas.

- Copiar los datos de los TDR 1 y TDR 2 a la base de datos.

**Figura 42**

*Ordenamiento de los datos*

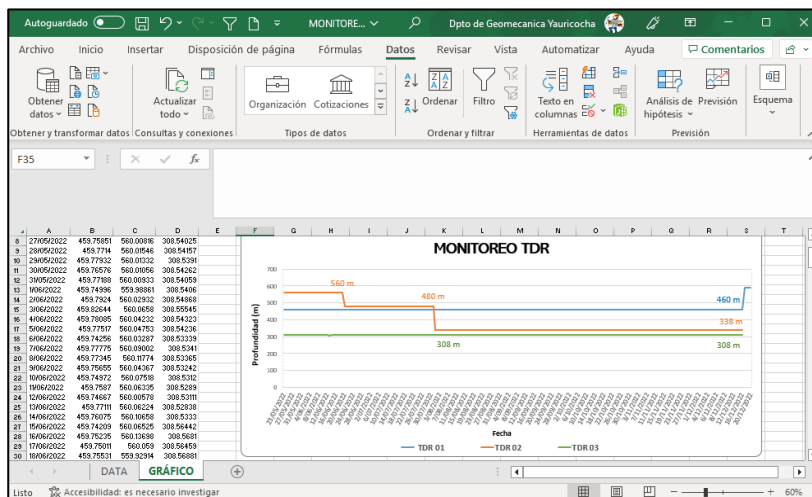


Fuente: Elaboración propia.

- Actualizar la tabla dinámica (promediar la cantidad de datos por fecha)

**Figura 43**

*Visualización de los cambios de longitud de lo cable TDR*



Fuente: Elaboración propia.

En caso de ocurrir algún cambio anómalo en el cable TDR mayor a 15 metros, se aplica el protocolo de monitoreo en campo para comprobar si el dato del monitoreo remoto es verídico debido a que el monitoreo remoto podría fallar

a causa de cambios climáticos, lluvias, tormentas eléctricas, infiltración de agua en el cable TDR. Si no hubiese ningún cambio de todas maneras es necesario que el monitoreo en campo se realice al menos 1 vez por mes para control y aseguramiento de los datos, a continuación, se explica los paso a realizar del monitoreo en campo con el equipo “data logger” (ver figura 44):

- Verificar que el equipo esté cargado

#### **Figura 44**

*Equipo de monitoreo de cable TDR data logger*



Fuente: Tomada por el tesista.

- Inspección del área de trabajo

**Figura 45**

*Verificación del área de trabajo*



Fuente: Tomada por el tesista.

- Retirar el candado de la caseta

**Figura 46**

*Caseta del cable TDR.*



Fuente: Tomada por el tesista.

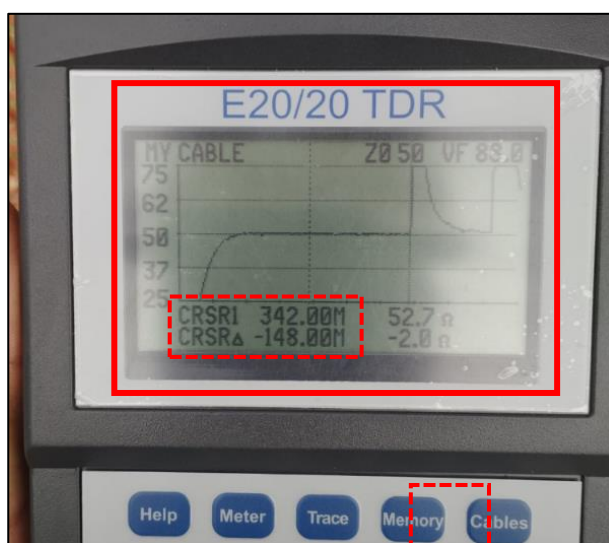


El monitoreo es fácil y práctico, únicamente consiste en conectar el cable al equipo (ver figura 48) luego presionar la tecla “CRSR 1” e inmediatamente se mostrará una gráfica el cual indica el estado del cable TDR.

- Monitorear el estado del cable TDR y guardar los datos

### Figura 49

*Monitoreo de cable TDR, gráfica de longitud*



Fuente: Tomada por el tesista.

En la figura 49 se visualiza el monitoreo en campo mediante el uso de data logger, dicho monitoreo del TDR 1 que fue ejecutado en diciembre del 2023, la gráfica en la pantalla del equipo muestra la longitud de cable actual (342 metros) el cual coincidió con la data remota.

En caso de falla de conexión al monitoreo remoto se deberá realizar el monitoreo en campo el cual incluye el uso del software del equipo data logger, este proceso toma más tiempo el cual podría generar pausas de la operación más prolongadas.



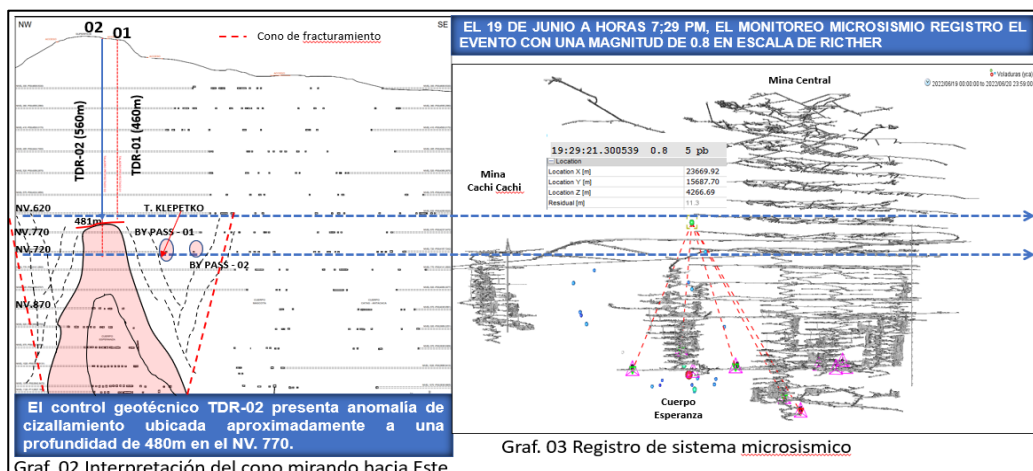
#### 4.1.7. Otros sistemas de monitoreo

En la unidad minera contamos con otros sistemas de monitoreo que ayudan a complementar el sistema de monitoreo de cable TDR, cuyos datos podrían proporcionar información confiable para predecir cambios de longitud en el cable, además de prevenir riesgos en el proceso de minado.

- **Sistema de monitoreo microsísmico:** El principal objetivo del sistema es el de detectar zonas sismogénicas dentro de la mina a partir de data histórica, de esa manera como geomecánicos poder prevenir este tipo de eventos por vibración o por pérdida de elasticidad en las rocas lo que genera lo que comúnmente conocemos como estallido de rocas, para el monitoreo del cono de subsidencia el sistema microsísmico puede detectar desprendimiento de grandes bloques de roca en el ascenso de la bóveda del cono, ya sea en las cajas o en la corona, el desprendimiento en la corona detectado como evento microsísmico natural por efecto del minado ocasiona que el cable TDR también detecte algún cambio.

**Figura 50**

*Sistema de monitoreo microsísmico*



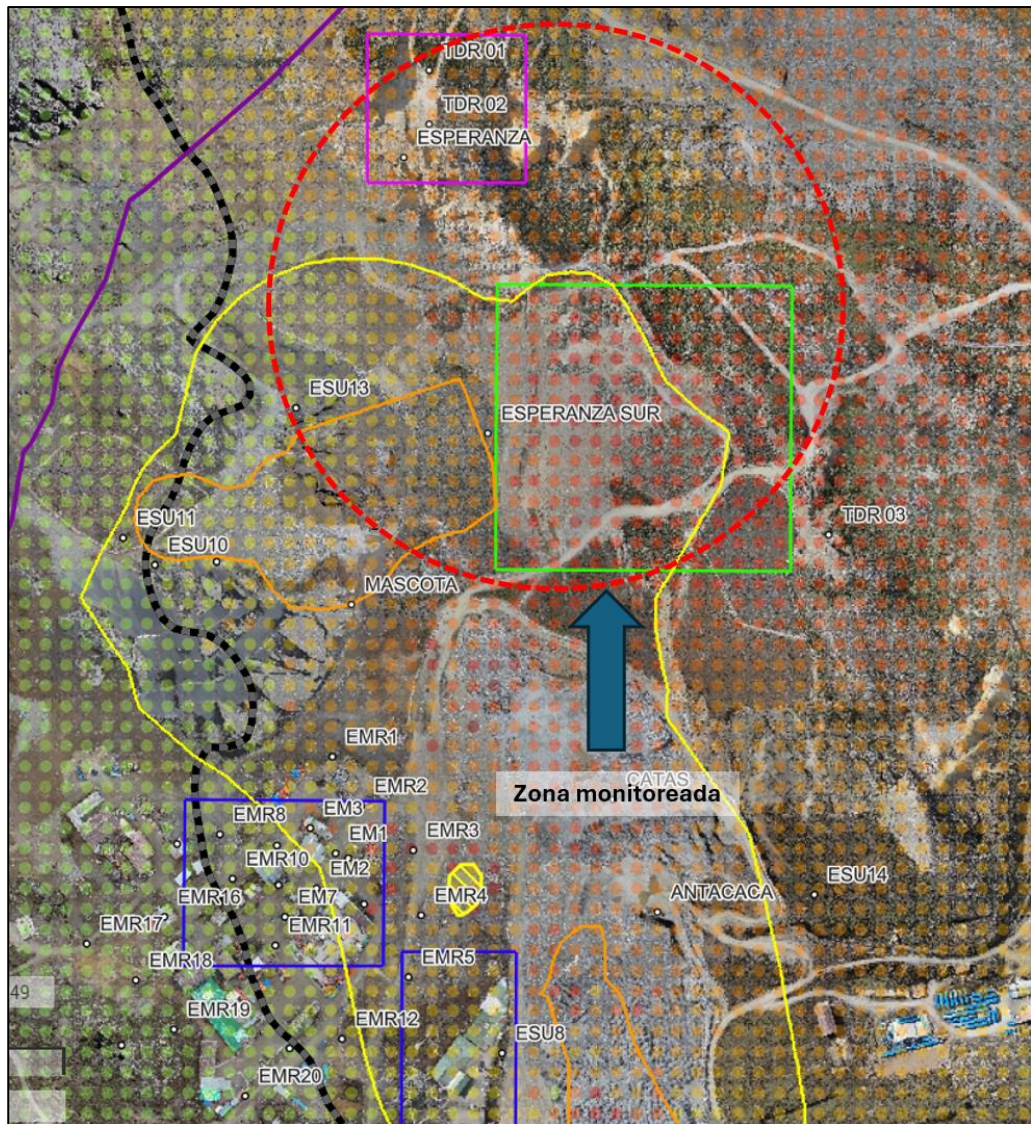
Fuente: Departamento de geomecánica.

➤ **Monitoreo con InSAR (Interferometría de radar de apertura sintética):**

La unidad minera cuenta con monitoreo satelital mediante la comparación de imágenes actuales con imágenes de fechas anteriores, se tiene una malla de 15x15 (puntos de monitoreo), el monitoreo te permite generar gráficas de desplazamiento acumulado y velocidad de desplazamiento.

**Figura 51**

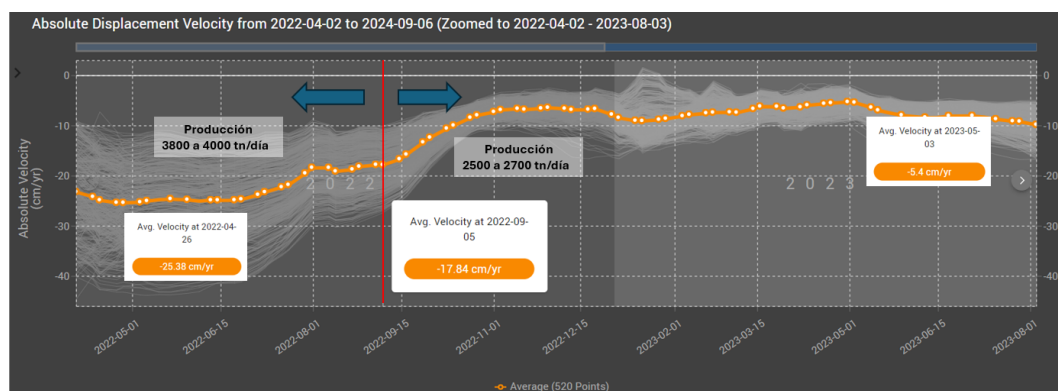
*Ubicación de la zona monitoreada*



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 52**

*Velocidad de desplazamiento zona de interés*



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con el monitoreo InSAR, en la figura 52 se interpreta que el ritmo de producción es un factor muy importante para el desarrollo o crecimiento del caving, se observa que a mayor producción entonces se genera mayor descenso superficial.

El presente estudio trata acerca de la interpretación de instrumentación geotécnica, por lo tanto, para mayor entendimiento del monitoreo es importante estudiar las condiciones geomecánicas de la estructura mineralizada que está siendo monitoreada debido a efectos del método de minado.

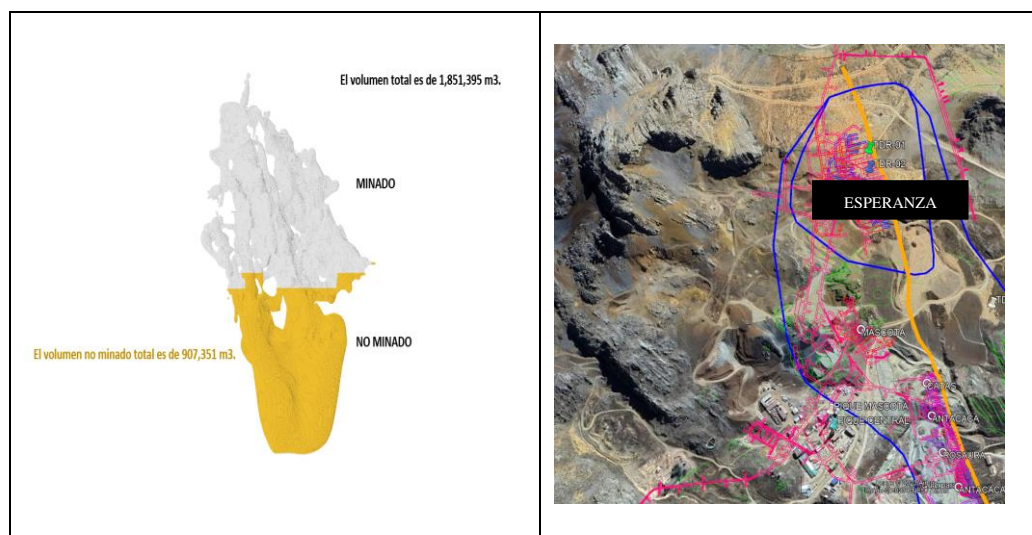
#### **4.1.8. Cuerpo Esperanza**

“El cuerpo esperanza presenta mineralización de Ag, Cu, Pb y Au en cuatro tipos de minerales: mineral polimetálico, mineral de cobre, mineral piritoso y mineral óxido. Desde una perspectiva económica son de gran interés los minerales de sulfuros de cobre y el polimetálico, dentro del gran cuerpo estos tipos de mineral se presentan a modo de paquetes aproximadamente tabulares e intercalados” (Soto Hinojosa, 2018, p.27).

El cuerpo esperanza está denominado como Tj.6950 y está ubicado al NW de la mina Yauricocha, aproximadamente a 650 metros de profundidad desde la superficie.

### Figura 53

*Vista perfil Esperanza y vista en planta de la zona de monitoreo*



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.9. Geología local del cuerpo mineralizado Esperanza

Basándose en los registros geológicos recopilados, la información de mapeos geotécnicos y los resultados de sondajes diamantinos existentes, junto con el análisis geomecánico de campo, se establece que la dirección del cuerpo mineralizado Esperanza es de NW-SE. Se ha determinado que las rocas encajonantes en la parte superior consisten en una roca intrusiva, mientras que en la parte inferior se encuentra una caliza recristalizada. Dentro de la zona del cuerpo mineralizado, se identifica una roca que ha sido alterada y triturada como resultado del proceso de mineralización.



#### **4.1.10. Geología estructural del cuerpo mineralizado Esperanza**

El cuerpo presenta una forma alargada en la dirección NW, siguiendo el curso de la falla Yauricocha. Su ángulo de inclinación es casi vertical, inclinándose predominantemente hacia el oeste. En algunos puntos locales, el ángulo de inclinación puede variar hacia el este antes de regresar nuevamente hacia el oeste.

#### **4.1.11. Caracterización de la masa rocosa del cuerpo mineralizado Esperanza**

La recopilación de datos geomecánicos se llevó a cabo mediante actividades de mapeo geomecánico en interior mina. Para esta tarea, se utilizó la metodología de mapeo geomecánico por celdas, en las estaciones de mapeo que abarcan el área de estudio, además de hacer uso de información histórica de los mapeos realizados por el departamento de geomecánica de la compañía.

#### **4.1.12. Aspectos litológicos del cuerpo mineralizado Esperanza**

Las características litológicas simplificadas del macizo rocoso que rodea el cuerpo Esperanza son las siguientes: en la parte SW se encuentran calizas, mientras que el propio mineral contiene minerales polimetálicos, en la parte NE se presenta roca intrusiva.

#### **4.1.13. Distribución de discontinuidades del cuerpo mineralizado Esperanza**

Luego de realizar mapeos estructurales en la zona del cuerpo Esperanza es necesario procesar los datos de las diferentes estructuras en el software Dips, desarrollado por M.S. Diederichs y E. Hoek perteneciente a Rocscience. Los mapeos fueron realizados en el Nv.1120 Piso (11, 5 y 0) y tomando data histórica para mayor exactitud en la elaboración de las proyecciones estereográficas.

## Cuadro 4

### Familias de discontinuidades estructurales

Descripción	Familia 1	Familia 2	Familia 3	Familia 4
Dip/Dip direction	70°/205°	78°/19°	66°/312°	77°/51°

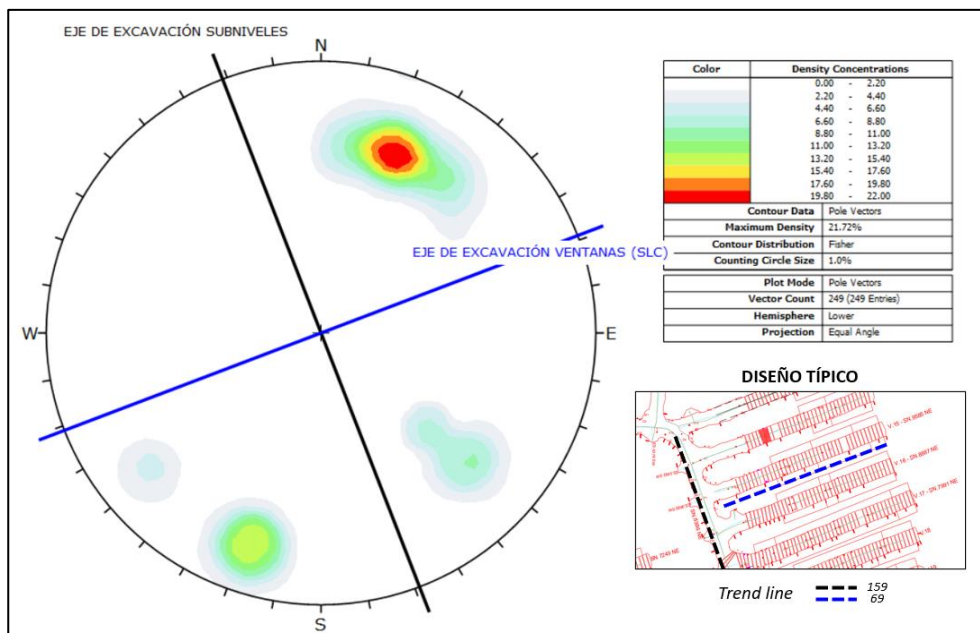
Fuente: Elaboración propia.

En base a la información registrada se determina lo siguiente:

- El arreglo estructural es obtenido en la roca caliza.
- Las familias 1 y 2 (sistemas principales) tiene rumbo aproximado de NW y buzamientos altos al NE.
- La familia 3 (secundario) tiene rumbo aproximado de NE y altos buzamientos SW respectivamente.
- La familia 4 (secundario) tiene rumbo aproximado de NW y altos buzamiento SE respectivamente.

## Figura 54

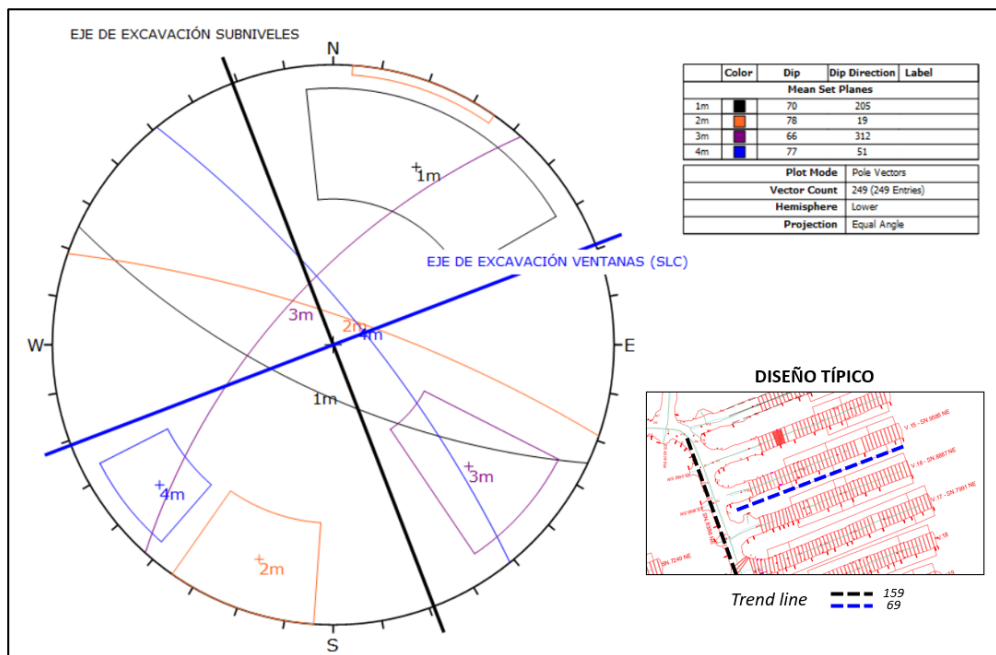
### Proyección estereográfica de contornos de discontinuidades



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 55**

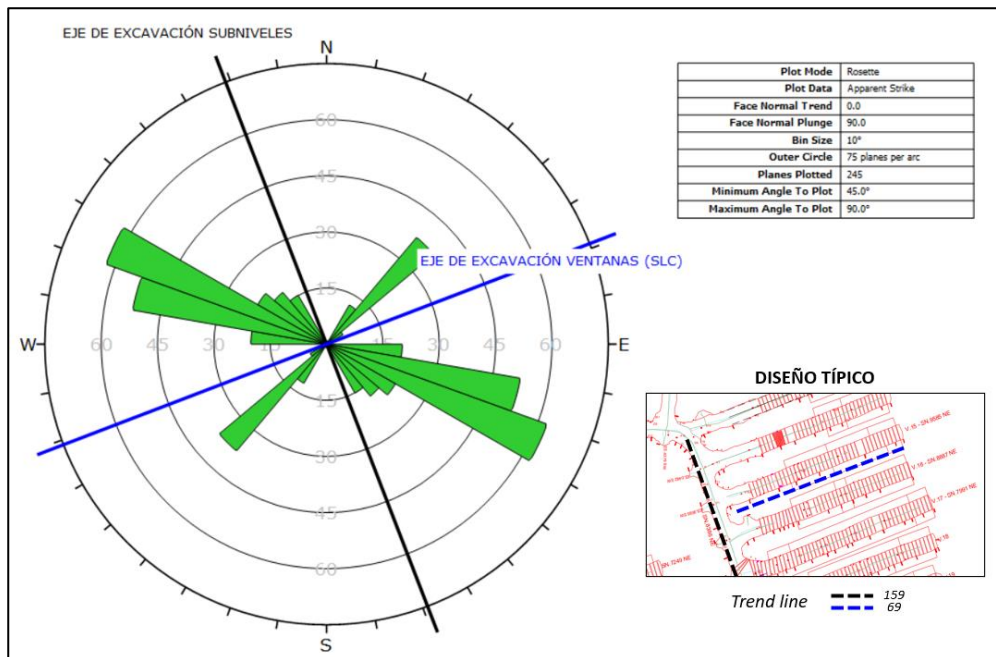
*Proyección estereográfica de familias principales de discontinuidades*



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 56**

*Diagrama de roseta del compósito de discontinuidades*



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.14. Aspectos estructurales

Las características estructurales se determinaron a través de observaciones realizadas en el lugar durante la ejecución de las labores de desarrollo que se están llevando a cabo en dirección al Cuerpo Esperanza. Según estas observaciones, las siguientes son las características estructurales de las discontinuidades presentes en el área del proyecto:

#### Cuadro 5

##### *Aspectos estructurales en Fallas*

Parámetro en discontinuidades mayores	
Espaciamiento	Mayores a 20 m
Persistencia	10 – 20 m
Relleno	Suave (arcillas)
Rugosidad	Lig. rugoso a liso
Apertura	Menor a 5 mm
Agua subterránea	Goteo

Fuente: Elaboración propia.

#### Cuadro 6

##### *Aspectos estructurales en Diaclasas*

Parámetro en discontinuidades menores	
Espaciamiento	De 6 a 20 cm y 20 a 60 cm
Persistencia	De 3 a 10 m
Relleno	Suave (carbonatos, arcillas)
Rugosidad	Lig. rugoso
Apertura	Menor a 1 mm
Agua subterránea	Húmedo

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.15. Clasificación de la masa rocosa

Para la clasificación del macizo rocoso, se llevó a cabo el mapeo geomecánico en el Nv.1120 (Piso 11, 5 y 0) en interior mina, posterior a ello se empleó los criterios de clasificación elaborados por Bieniawski (Rock Mass Rating – RMR). A partir de ello ha sido posible identificar 2 dominios geomecánicos marcadamente diferenciados y 2 dominios geomecánicos



secundarios. En la siguiente tabla se presenta el criterio empleado para clasificar el macizo rocoso.

**Tabla 5**

*Criterios de clasificación del macizo rocoso*

Tipo de roca	Rango RMR	Rango Q	Calidad según RMR
II	>60	>5.92	Buena
IIIA	51 – 60	2.18 – 5.92	Regular A
IIIB	41 – 50	0.72 – 1.95	Regular B
IVA	31 – 40	0.24 – 0.64	Mala A
IVB	21 – 30	0.08 – 0.21	Mala B
V	<21	<0.08	Muy Mala

Fuente: Departamento de geomecánica.

Por lo tanto, los resultados de la clasificación geomecánica considerando los rangos según el RMR se presenta en la tabla inferior.

**Tabla 6**

*Criterios de clasificación del macizo rocoso*

Unidad geológica	Tipo de macizo rocoso		RMR Prom.	Índice Q
Caliza	IIIB	Regular	45	1.12
Caliza alterada	IVA	Mala	35	0.37
Intrusivo	IVA	Mala	35	0.37
Mineral polimetálico	IVB	Mala	25	0.12

Fuente: Departamento de geomecánica.

- En la caliza se observa que por lo general va desde regular IIIB hasta mala IVA.
- En mineral varía desde mala IVB hasta calidad muy mala V (modo puntual).
- En intrusivo es similar al mineral, solamente presenta calidad regular IIIB de manera localizada.

La calidad de roca va de regular a mala debido también a la cercanía de la falla Yauricocha. Considerando la clasificación geomecánica, se realiza la zonificación tanto en la caja como en el cuerpo mineralizado.

#### 4.1.16. Resistencia de la roca intacta

Uno de los parámetros más significativos con relación al comportamiento mecánico de la masa rocosa es la resistencia compresiva no confinada de la roca intacta (UCS). Para ello el departamento de geomecánica de la unidad minera ha realizado un muestreo sistemático de los testigos diamantinos tanto en mineral, en la caliza y el intrusivo. Los ensayos fueron: Ensayo de compresión uniaxial y ensayos de compresión triaxial, en la presente investigación solamente se detallará los datos usados para el modelamiento de esfuerzos.

**Tabla 7**

*Ensayo de compresión simple (UCS)*

LITOLOGÍA	CÓDIGO DE MUESTRA	DIÁ. "d" (mm)	ALT. "h" (MM)	CARGA (Kn)	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAXIAL - UCS (d) (Mpa)
IN	CO-01-MV-01	61.1	145.7	174.74	60.19
IN	CO-01-MV-09	60.8	146.3	225.43	77.39
CZ	D-ESP-17-17-09A-MV-01	63.3	129.6	75.54	42.63
CZ	D-ESP-17-17-09A-MV-05	60.9	129.5	56.41	60.07
SK	E-CSM-19-21-10-MV-07	47.6	125.9	63.99	49.29
SK	E-CSM-19-21-10-MV-09	47.3	128.9	87.7	35.96
SF	CO-02-MV-13	60.9	143.7	67.39	23.13

Fuente: Departamento de geomecánica.

En la tabla 8 se presenta los resultados del ensayo de compresión triaxial, que además de la resistencia compresiva de roca intacta se obtuvo el parámetro “mi” de la roca intacta del criterio de falla de Hoek & Brown (2002- 2006). Así mismo se obtiene parámetros de la resistencia al corte de Mohr Coulomb: cohesión y ángulo de fricción de la roca intacta.

**Tabla 8***Ensayo triaxial (TX)*

LITOLOGÍA	CONF. o) (MPo)	ESFUERZO COMP. (MPo)	HOEK BROWN		MOHR COULOMB	
			RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAxIAL-UCS(t) (MPa)	CONSTANTE "mi"	COHESIÓN (MPa)	ANGULO DE FRICCIÓN INTERNO (°)(°)
IN	2.00	179.63	154.29	24.08	25.09	55.02
	4.00	199.15				
	8.00	239.94				
IN	2.00	24.39	10.10	23.04	4.48	38.12
	4.00	39.06				
	8.00	50.99				
IN	2.00	152.19	128.59	22.52	21.92	53.64
	4.00	170.40				
	8.00	207.77				
IN	2.00	159.24	137.87	20.75	23.89	52.84
	4.00	178.53				
	8.00	212.67				
IN	2.00	158.24	137.18	24.13	22.97	54.41
	4.00	188.53				
	8.00	218.67				
CZ	2.00	58.55	50.77	7.34	13.51	35.48
	4.00	69.62				
	8.00	81.86				
IN	2.00	114.70	107.06	7.59	26.31	38.12
	4.00	100.84				
	8.00	11.84				
CZ	2.00	124.31	94.16	6.48	24.52	35.45
	4.00	124.31				
	8.00	74.37				
	4.00	212.02				
	8.00	60.38				
CZ	2.00	76.95	48.49	13.05	11.49	42.66
	4.00	92.84				
	8.00	101.07				
SK	2.00	120.57	82.41	19.48	15.91	50.09
	4.00	92.84				

Fuente: Departamento de geomecánica.

**Tabla 9***Resistencia a la tracción de la roca intacta*

LITOLÓGÍA	CÓDIGO DE MUESTRA	CARGA (kN)	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN INDIRECTA (MPa)	PROMEDIO RESISTENCIA A LA TRACCIÓN INDIRECTA (MPa)
IN	C0-01-MV-01	27.44	9.45	8.82
		28.11	8.88	
		23.77	8.12	
IN	C0-01-MV-03	17.27	5.70	6.21
		19.55	6.65	
		18.66	6.30	
IN	C0-01-MV-10	25.39	9.19	9.92
		28.11	10.33	
		31.10	10.25	
IN	C0-01-MV-11	32.42	10.62	7.49
		19.80	6.72	
		15.64	5.13	
IN	C0-04-MV-01	26.68	8.66	7.72
		21.41	6.87	
		23.48	7.65	
IN	C0-04-MV-05	31.29	10.19	9.09
		25.92	8.57	
		25.18	8.52	
Cz	C0-02-MV-01	9.33	3.14	3.13
		7.88	2.75	
		10.44	3.51	
Cz	C0-02-MV-02	14.44	4.97	4.68
		13.73	4.57	
		13.49	4.49	
Cz	C0-02-MV-06	17.33	5.92	5.44
		16.52	5.33	
		16.03	5.06	
IN	C0-02-MV-15	17.95	6.24	5.29
		15.14	5.26	
		12.39	4.38	

Fuente: Departamento de geomecánica.

Por otro lado, con el propósito de calcular la densidad de las distintas variedades de rocas existentes en la región de análisis, se llevaron a cabo pruebas de propiedades físicas.

**Tabla 10***Propiedades físicas de la roca intacta*

Sondaje	Profundidad (m)	Litología	Porosidad Aparente (%)	Absorción (%)	Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )
ESP-13-15-08	21.45 - 21.57	Caliza	0.57	0.21	2.73
ESP-13-15-09	212.7 - 212.8	Intrusivo	1.26	0.47	2.67
ESP-13-15-02	21.93 - 22.16	Mineral	5.8	1.52	3.81

Fuente: Departamento de geomecánica.

**4.1.17. Resistencia de las discontinuidades**

Para el análisis de la estabilidad estructuralmente controlada de las labores subterráneas más profundas que están en operación del Cuerpo Esperanza, es importante conocer las características de resistencia al corte directo (CD). En la tabla 11 se detallan los datos que se utilizarán en el estudio presente.

**Tabla 11***Ensayo de corte directo en discontinuidades*

LITOLÓGÍA	FUERZA NORMAL (kN)	FUERZA DE CORTE (kN)	ESFUERZO NORMAL (kPa)	ESFUERZO DE CORTE (kPa)	ISRM Suggested Method		JRC
					COHESIÓN (MPa)	ANGULO DE FRICCIÓN RESIDUAL	
IN	1.00	1.11	342.51	381.01	0.09	40.72	0
	2.00	2.02	685.03	692.22			
	3.00	2.86	1027.54	978.60			
	4.00	3.70	1370.05	1268.22			
IN	1.00	1.17	265.26	310.17	0.13	35.19	6
	2.00	1.96	530.52	519.88			
	3.00	2.57	795.77	681.69			
	4.00	3.32	1061.03	879.73			
IN	1.00	0.70	345.57	242.76	0.06	30.43	0
	2.00	1.42	691.13	489.32			
	3.00	1.93	1036.70	667.01			
	4.00	2.49	1382.27	860.29			
CZ	1.00	1.02	343.64	351.89	0.06	39.58	0
	2.00	1.80	687.28	617.52			
	3.00	2.65	1030.92	909.99			
	4.00	3.50	1374.56	1201.33			

Fuente: Departamento de geomecánica.

#### 4.1.18. Resistencia del macizo rocoso

En la tabla 12 se presenta los datos sobre las propiedades de resistencia de la masa rocosa por dominios estructurales o principales tipos de rocas que están involucrados con el minado del cuerpo Esperanza.

**Tabla 12**

*Propiedades de resistencia de la masa rocosa*

LITOLOGÍA	CÓDIGO DE MUESTRA	DIÁ. "d" (mm)	ALT. "h" (mm)	MÓDULO DE YOUNG "E" (GPa) (Transductores)	MÓDULO DE YOUNG "E" (GPa) (Strain Gauges)	RELACIÓN DE POISSON "v" (Strain Gauges)
IN	C0-01MV-03	60.80	146.10	16.78	19.05	0.15
IN	C0-01MV-10	61.00	146.20	11.53	17.24	0.12
IN	C0-04 MV-01	60.90	145.70	16.38	20.55	0.17
CZ	C0-02 MV-07	60.90	145.60	9.16	11.42	0.12
CZ	C0-02 MV-09	60.70	145.30	23.65	33.80	0.11
IN	C0-03 MV-01	60.90	145.50	11.18	19.95	0.09
IN	C0-03 MV-23	61.10	146.00	12.47	10.84	0.07
IN	C0-03 MV-24	61.00	145.20	9.46	13.99	0.10

Fuente: Departamento de geomecánica.

#### 4.1.19. Agua subterránea - Unidades hidrogeológicas

Las Unidades Hidrogeológicas permiten agrupar formaciones geológicas de similares características, permitiendo el tránsito del flujo subterráneo en relación con el parámetro hidrogeológicos y a fin de obtener dichos parámetros se necesitan realizar ensayos hidráulicos, revisar información teórica y correlacionarlos según la litología, alteraciones en la roca y control estructural; por lo expuesto, se menciona a continuación el detalle de las unidades hidrogeológicas de la unidad minera.

- UH Sedimentaria (Formación Jumasha) – Acuífero Libre: Corresponde a las rocas calizas pertenecientes a la formación Jumasha. Esta roca presenta moderado a alto fracturamiento, permite el paso del flujo subterráneo por sus

fracturas, zonas de brecha reactivadas por el cono de subsidencia y por las cavidades kársticas generadas por el flujo subterráneo, determinando que la composición del agua debe contener un pH ligeramente ácido para la generación de cavidades profundas.

- UH Intrusivo (Granodiorita) – Acuífero Fracturado: Respecto a la unidad hidrogeológica Intrusivo, se presenta como dos zonas principales, un intrusivo fracturado con tramos muy fracturados (Cizallados) distal al cuerpo mineralizado, considerada como Zona 1 y un intrusivo altamente fracturado - argilizado en contacto con la mineralización y caliza considerada como zona 2. Esta información se ha obtenido de taladros de drenaje perforados por el área de Hidrogeología.

#### **4.1.20. Esfuerzos in – situ**

Se ha estimado el esfuerzo vertical a partir del criterio de carga litostática (Hoek & Brown, 1978), considerando profundidades máximas de las áreas de mineralización actualmente conocidas. Según este criterio, la profundidad actual del minado es de 939.6m considerando el nivel hasta superficie, aquí el esfuerzo vertical es aproximadamente 33.4 MPa que es considerado como una magnitud de moderada a alta. El Cuerpo Esperanza está siendo explotado en el piso 05, siendo la profundidad acumulada en este nivel de 920.3 m, significando un esfuerzo vertical de 31.3 MPa, que en este caso ya es considerado como de magnitud media - alta.

El valor de la constante “k” (relación de los esfuerzos horizontal / vertical) para determinar el esfuerzo in-situ horizontal, estimado a partir de la utilización del criterio de Sheorey (1994), es aproximadamente 0.5. Como conclusión,

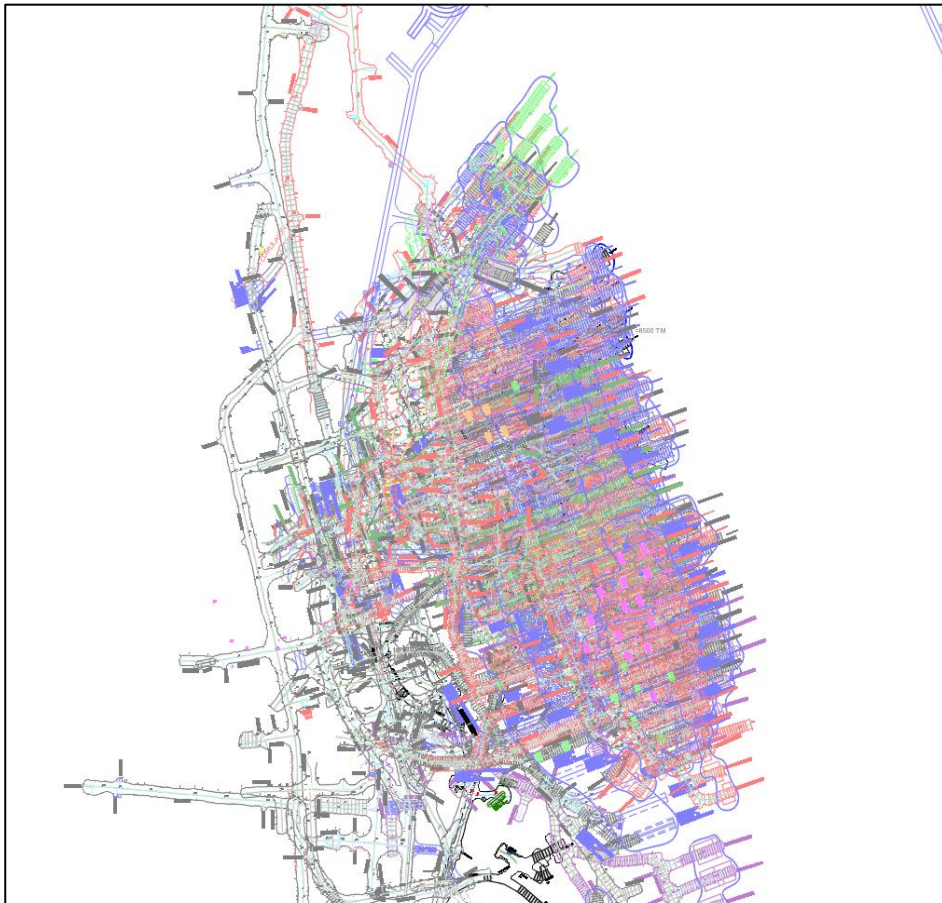
señalamos que los niveles de esfuerzos in-situ asociados con el minado del Cuerpo Esperanza serán de magnitud de moderados a altos.

#### **4.1.21. Modelamiento del cono de subsidencia**

Para una mejor interpretación del monitoreo de cable TDR, se realiza el modelamiento del cono de subsidencia del Cuerpo Esperanza de la Unidad minera, el análisis se realizó desde el nivel de inicio del método de minado hasta la actualidad, teniendo en cuenta los diferentes niveles y pisos.

#### **Figura 57**

*Composito de labores de explotación del Cuerpo Esperanza*

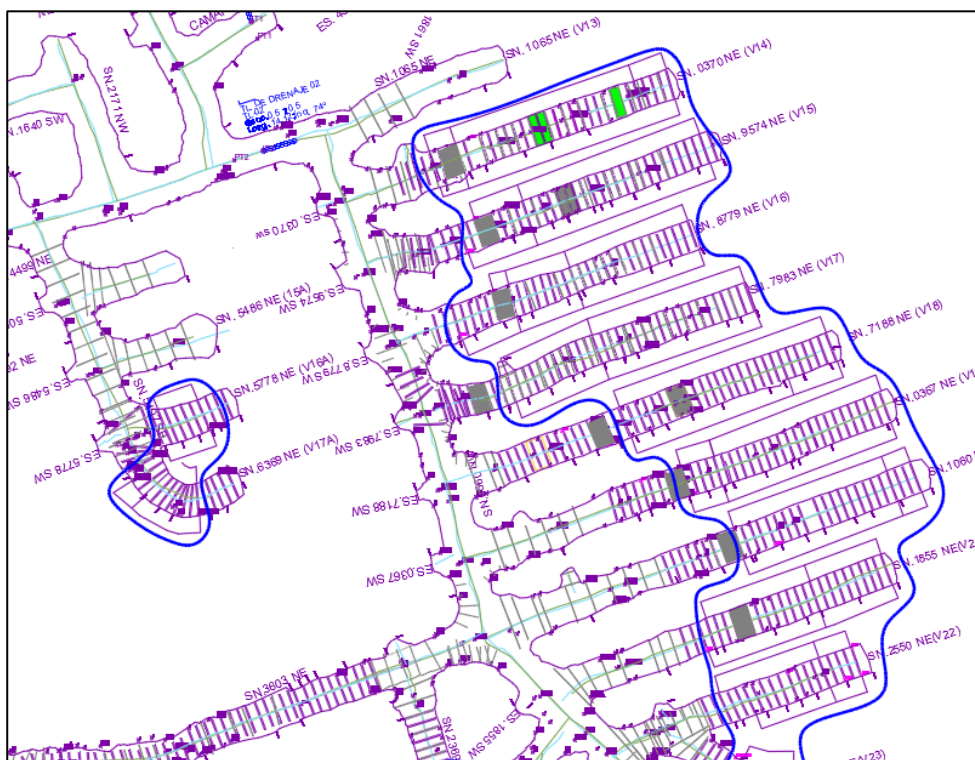


Fuente: Elaboración propia.



**Figura 58**

*Contorno de minado – vista 2D*

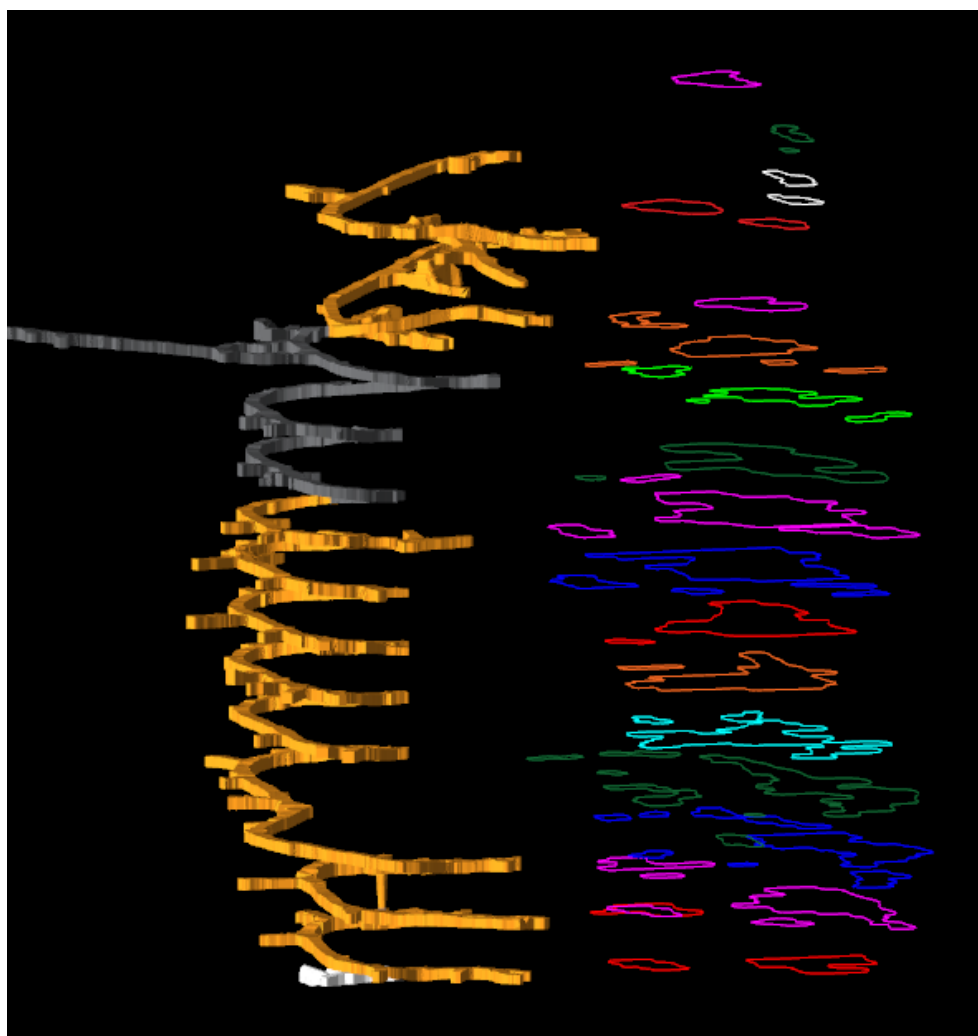


Fuente: Elaboración propia

La figura 58 muestra el contorno de minado del Nv.1120 P11, todo lo que está dentro del contorno de color azul representa lo que se ha explotado y no se ha rellenado, dicho contorno se ha construido en base a registros de levantamientos topográficos.

**Figura 59**

*Contorno de minado – vista isométrica 3D*

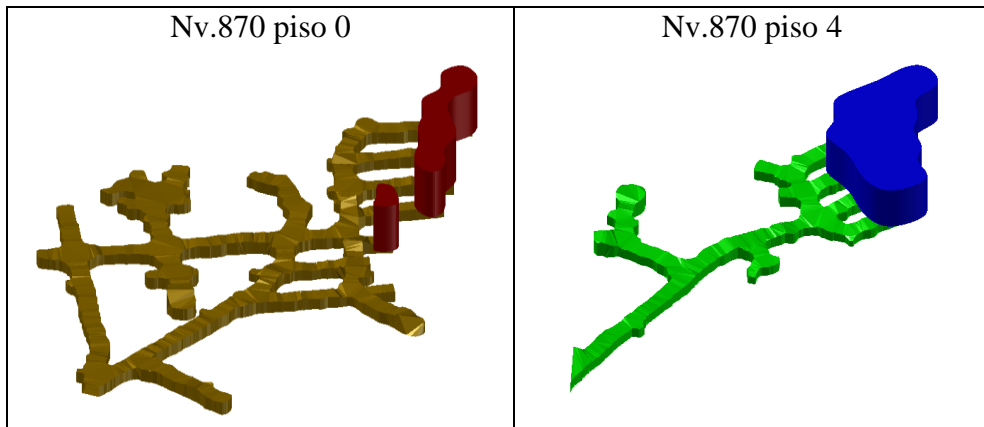


Fuente: Elaboración propia.

Basado en los contornos generados nivel a nivel y piso por piso, donde se ha realizado el método de minado, se procede a la creación de sólidos minados en 3D mediante el uso del software AutoCAD. Estos sólidos representan con la extensión del mineral explotado a lo largo de los años. Cabe destacar que no se ha ejecutado un programa de relleno adecuado que sustituya el material extraído, por lo tanto, se genera un vacío a medida que se va explotando. Los sólidos 3D se presentan a continuación:

**Figura 60**

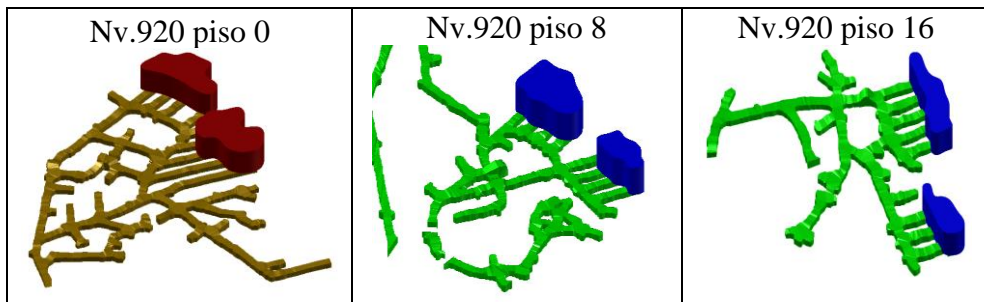
*Sólido 3D zona explotada Nivel 870*



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 61**

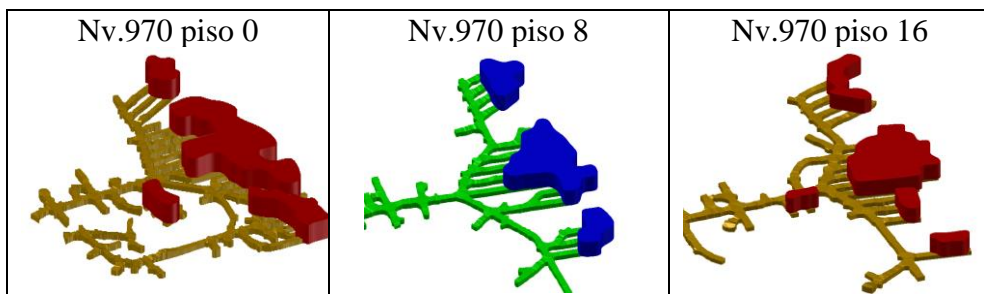
*Sólido 3D zona explotada Nivel 920*



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 62**

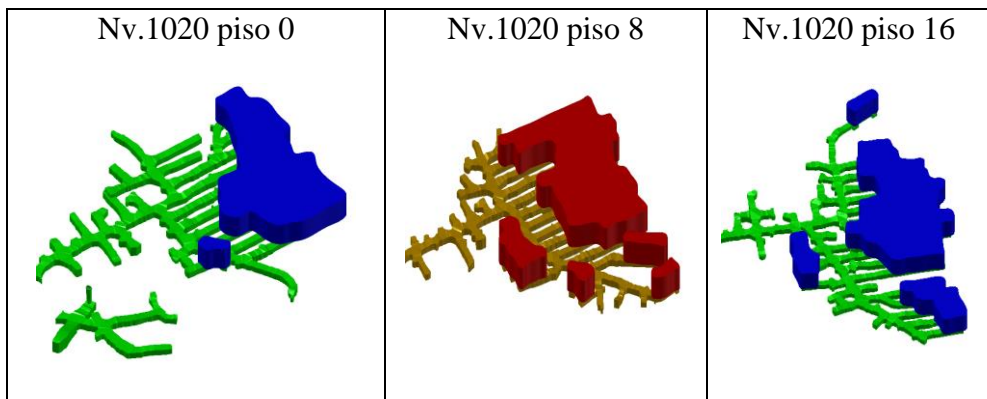
*Sólido 3D zona explotada Nivel 970*



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 63**

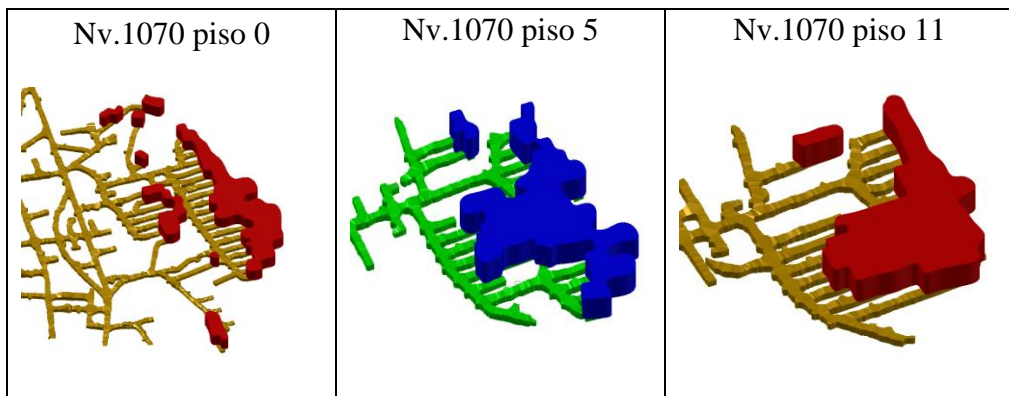
*Sólido 3D zona explotada Nivel 1020*



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 64**

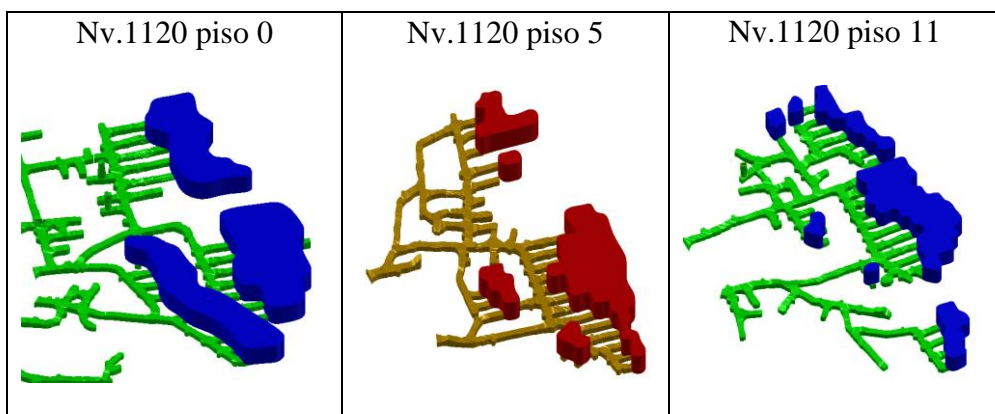
*Sólido 3D zona explotada Nivel 1070*



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 65**

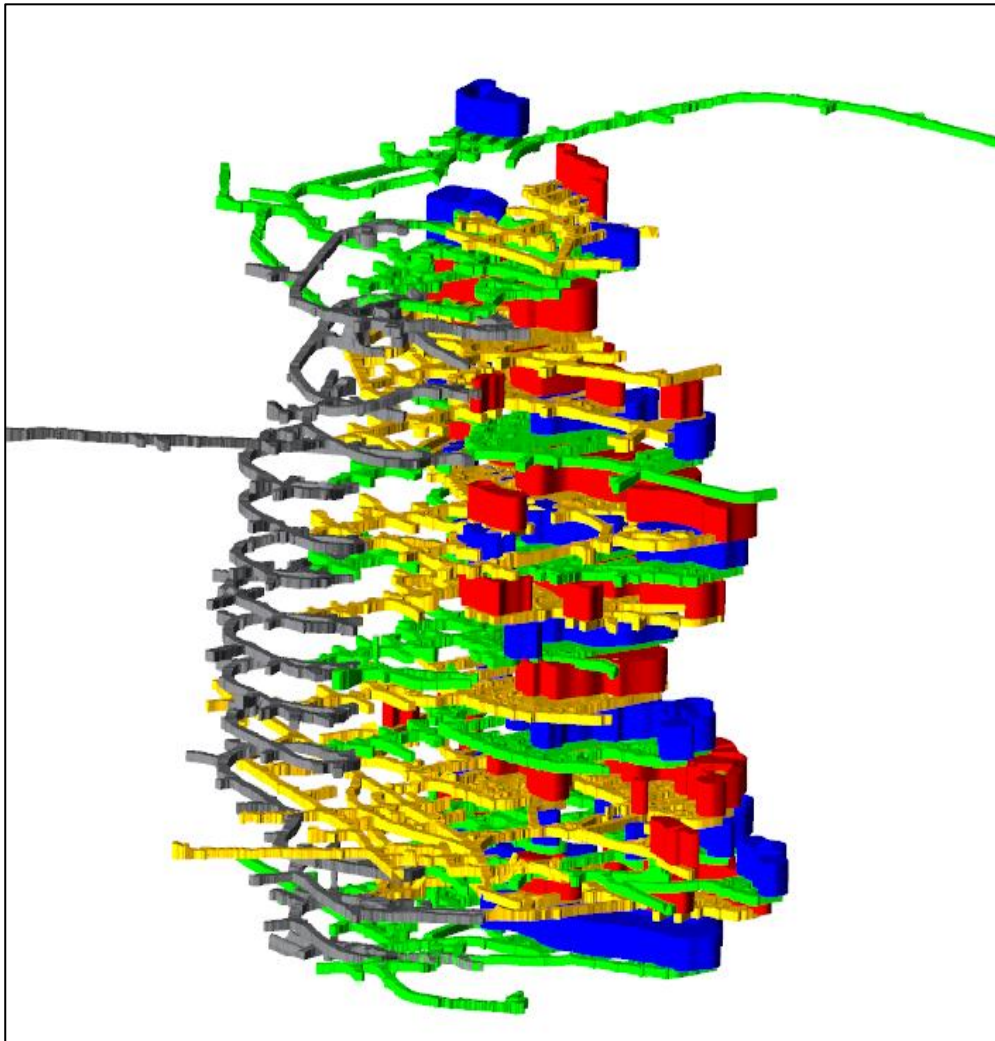
*Sólido 3D zona explotada Nivel 1120*



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 66**

*Modelamiento 3D de los niveles y pisos explotados*

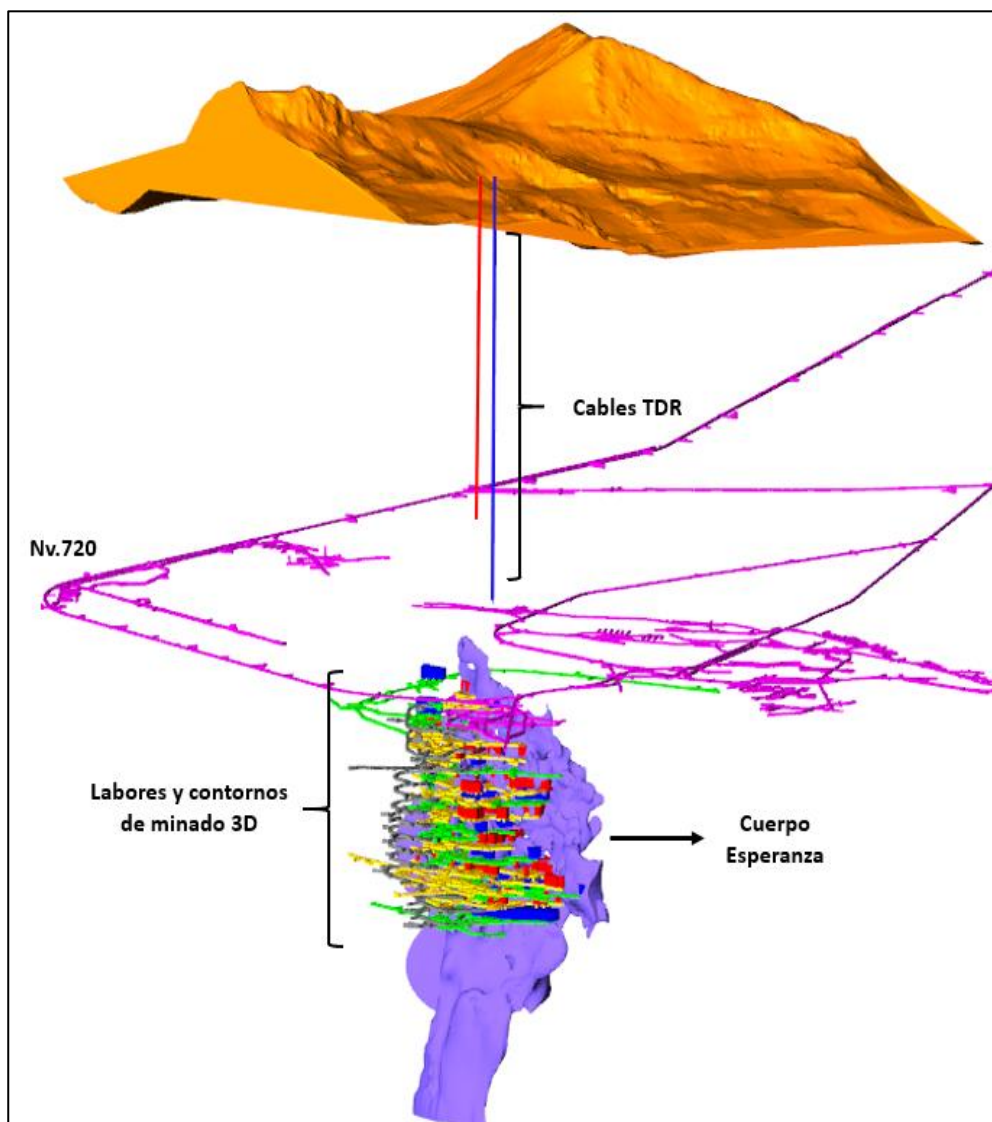


Fuente: Elaboración propia

La figura 66 representa el resultado de los contornos de minado en su totalidad a lo largo de la explotación del cuerpo mineralizado Esperanza.

**Figura 67**

*Minado del cuerpo Esperanza y proyección de los cables TDR*



Fuente: Elaboración propia.

La representación de las zonas minadas con vista de los cables TDR y la estructura mineralizada fue procesada en el software deswik CAD.

#### **4.1.22. Modelamiento numérico de la subsidencia**

Para estimar los valores de los esfuerzos inducidos en el cono de subsidencia, se realizó el modelamiento numérico para el cual se toma como base los datos de la caracterización geomecánica, geología de la unidad minera, entre



otros. Por consiguiente, para generar un modelamiento numérico es necesario diferentes inputs muy importantes los cuáles son:

- Modelo geométrico
- Modelo geológico y estructural
- Modelo geomecánico

Entonces, para el presente estudio se realizó el modelamiento del corte longitudinal transversal el cual corta los dos cables TDR (zona de interés), este análisis permitirá determinar los esfuerzos inducidos por el método de minado teniendo en cuenta el estado insitu (sin perturbar), otro en estado de minado y finalmente con la interpretación del cable TDR.

#### **4.1.22.1. Simulación y análisis de esfuerzo principal sigma 1**

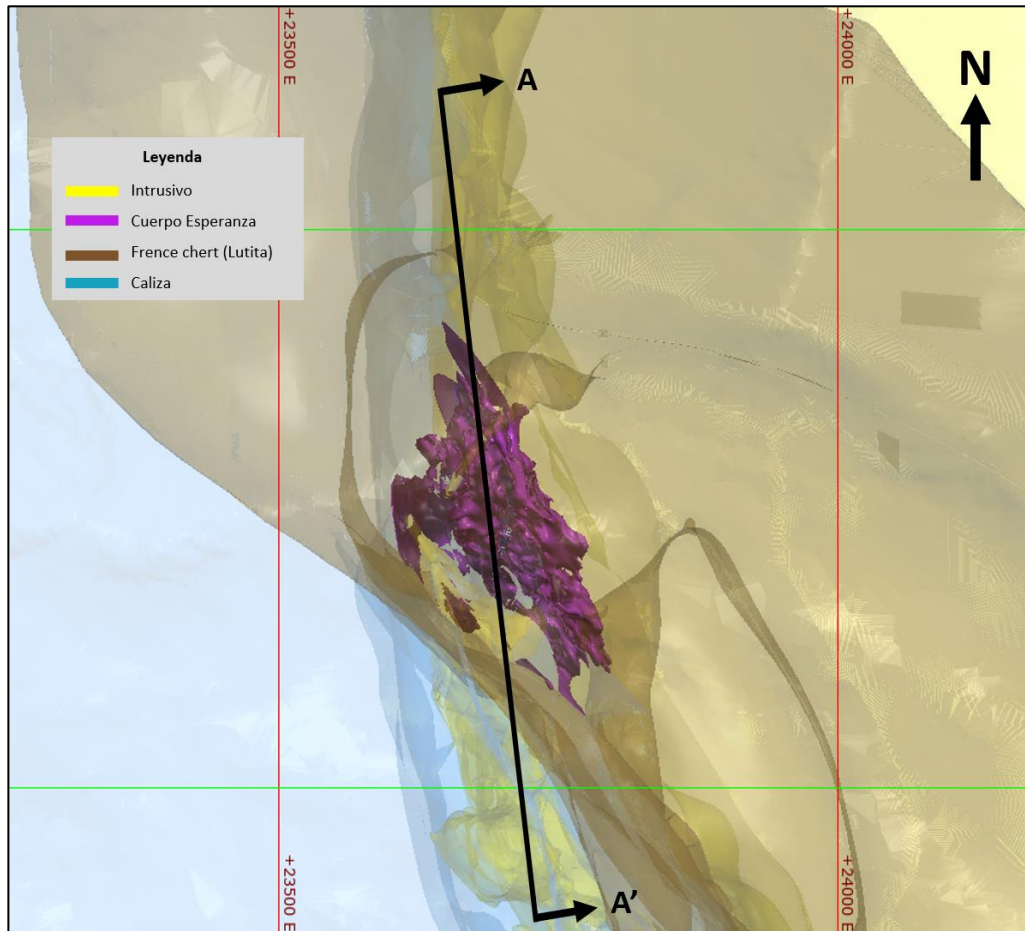
Teniendo como objetivo el predecir el comportamiento de la masa rocosa circundante a la excavación y la zona de vacíos se ha efectuado el análisis de esfuerzos en dos dimensiones mediante modelamiento numérico.

La herramienta empleada en el análisis de estabilidad es el programa RS2 de Rocscience (2023), el cual emplea la metodología de elementos finitos para materiales elasto-plásticos en dos dimensiones.

Para ingresar los datos y el modelo geométrico en el software RS2 es necesario realizar un corte o sección a la zona de mayor interés para simular y analizar, por lo tanto, la línea de corte para el presente trabajo de investigación pasa por los dos cables TDR proyectados hacia el Cuerpo Esperanza.

**Figura 68**

*Línea de corte en la zona de interés a analizar*

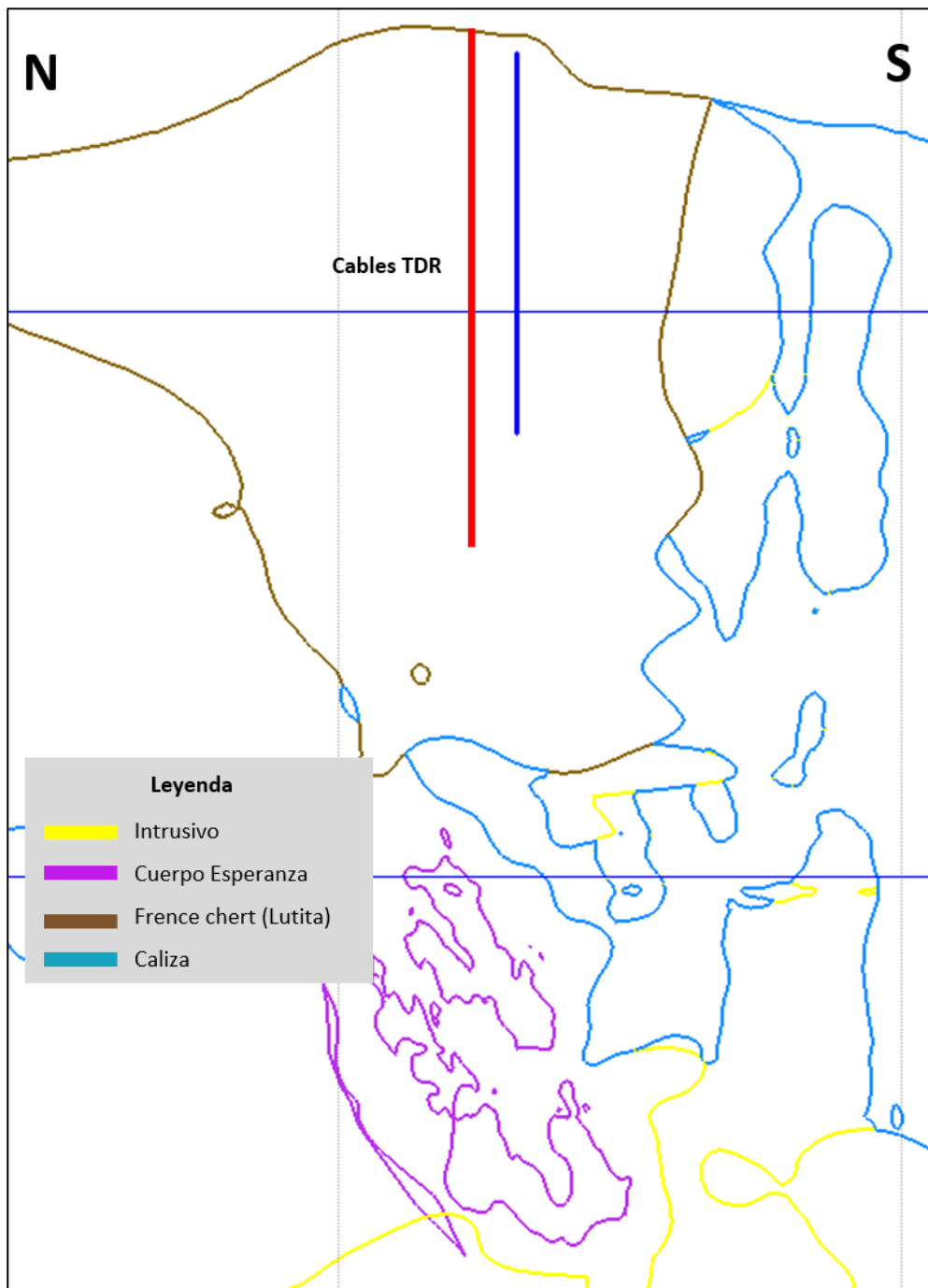


Fuente: Elaboración propia.



**Figura 69**

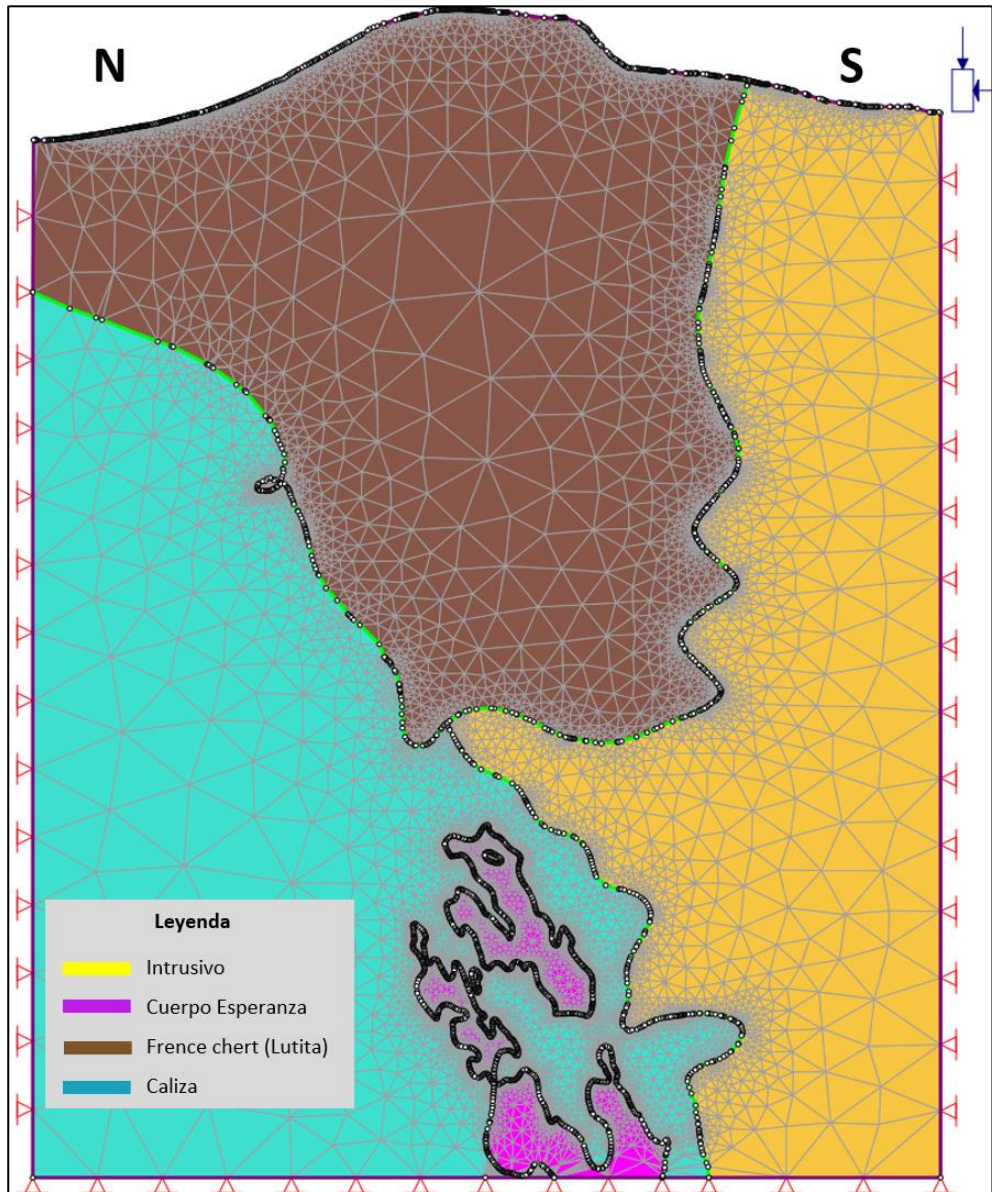
*Sección A-A' corte longitudinal de la zona sin perturbar*



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 70**

*Malla de elementos finitos de la sección A-A'*

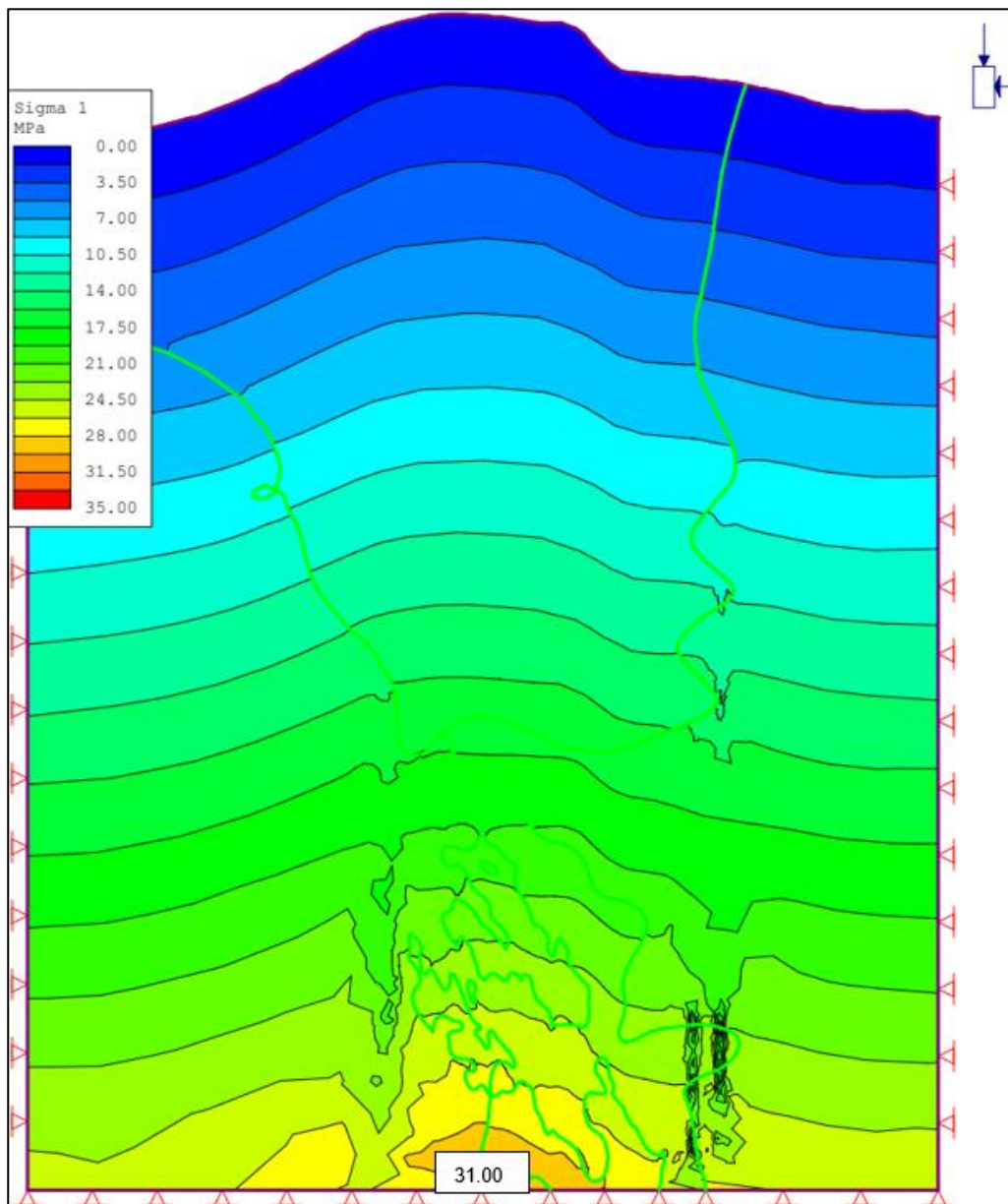


Fuente: Elaboración propia.

En la figura 70 se presenta la malla de elementos finitos en el modelo geométrico, método por el cual se realiza el cálculo para la simulación de los esfuerzos in situ.

**Figura 71**

*Análisis del esfuerzo principal sigma 1 (MPa)*



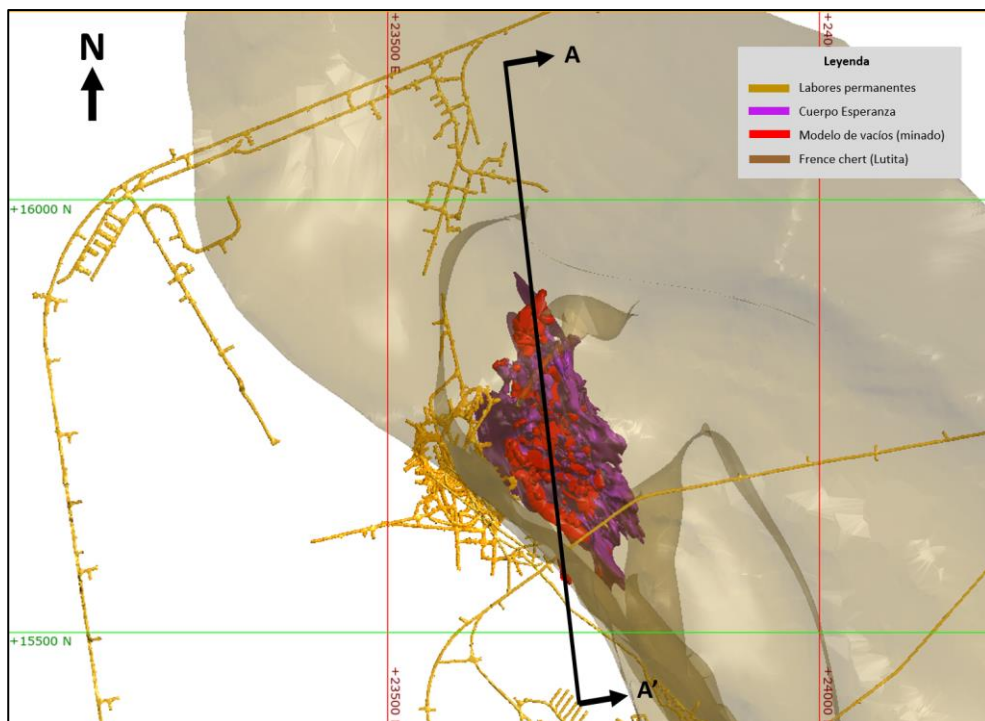
Fuente: Elaboración propia.

En estado insitu (sin la extracción de mineral y generación de excavaciones subterráneas) la mayor concentración de esfuerzos se da en las zonas de contacto litológico, y en la zona de mayor profundidad llegando a valores de hasta 31 Mpa.

Como parte del enfoque del estudio, para afirmar la correlación entre la formación del caving (hundimiento) y los esfuerzos inducidos, a continuación, se presenta la línea de corte o sección en la zona de interés, pero tomando como dato el modelo de vacíos (minado) a lo largo de la explotación del Cuerpo Esperanza, en caso hipotético de que este no se auto rellene y tampoco cuente con un ascenso de la bóveda.

**Figura 72**

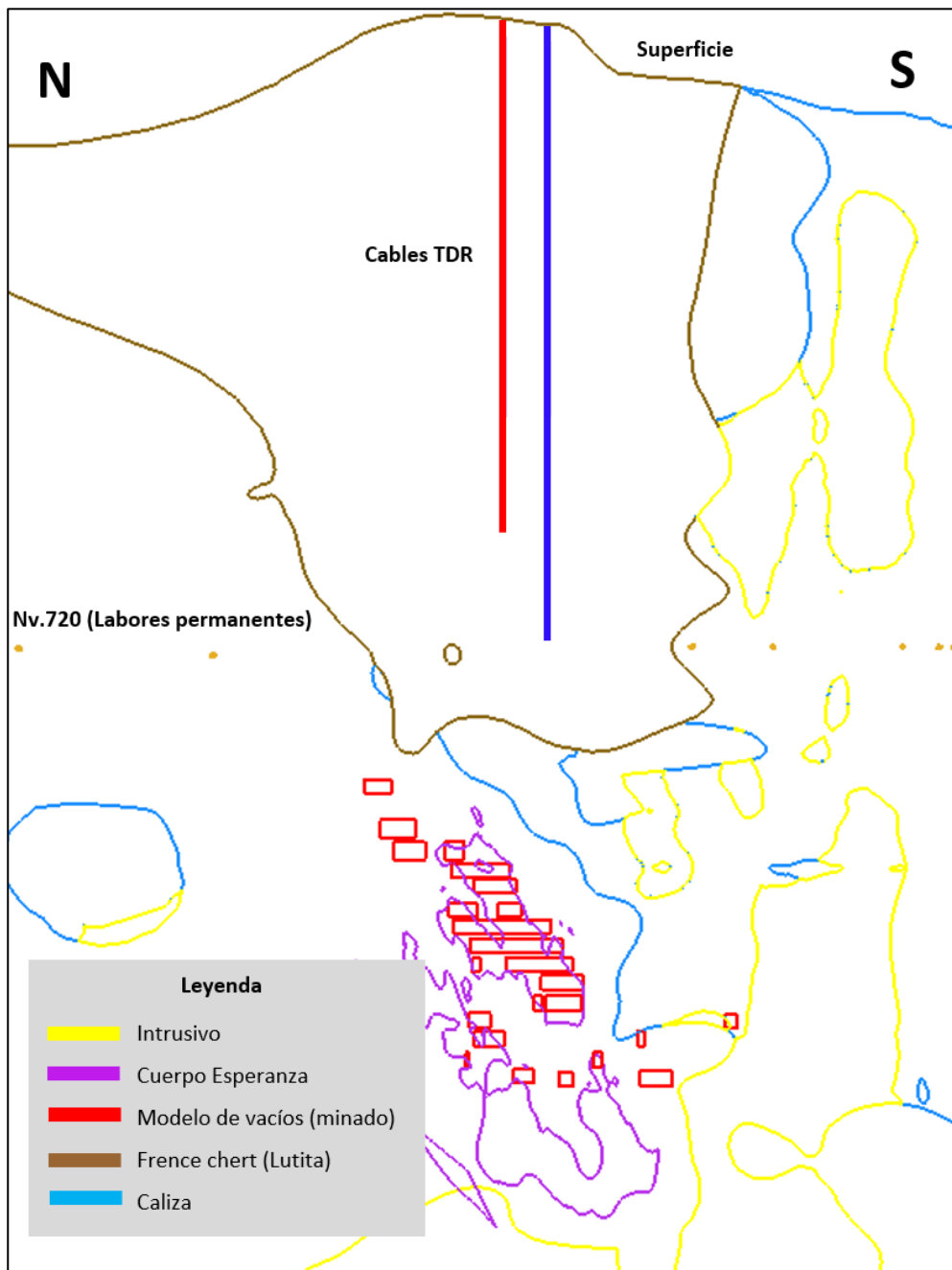
*Línea de corte en la zona de interés a analizar*



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 73**

*Sección A-A' corte longitudinal de la zona de estudio*

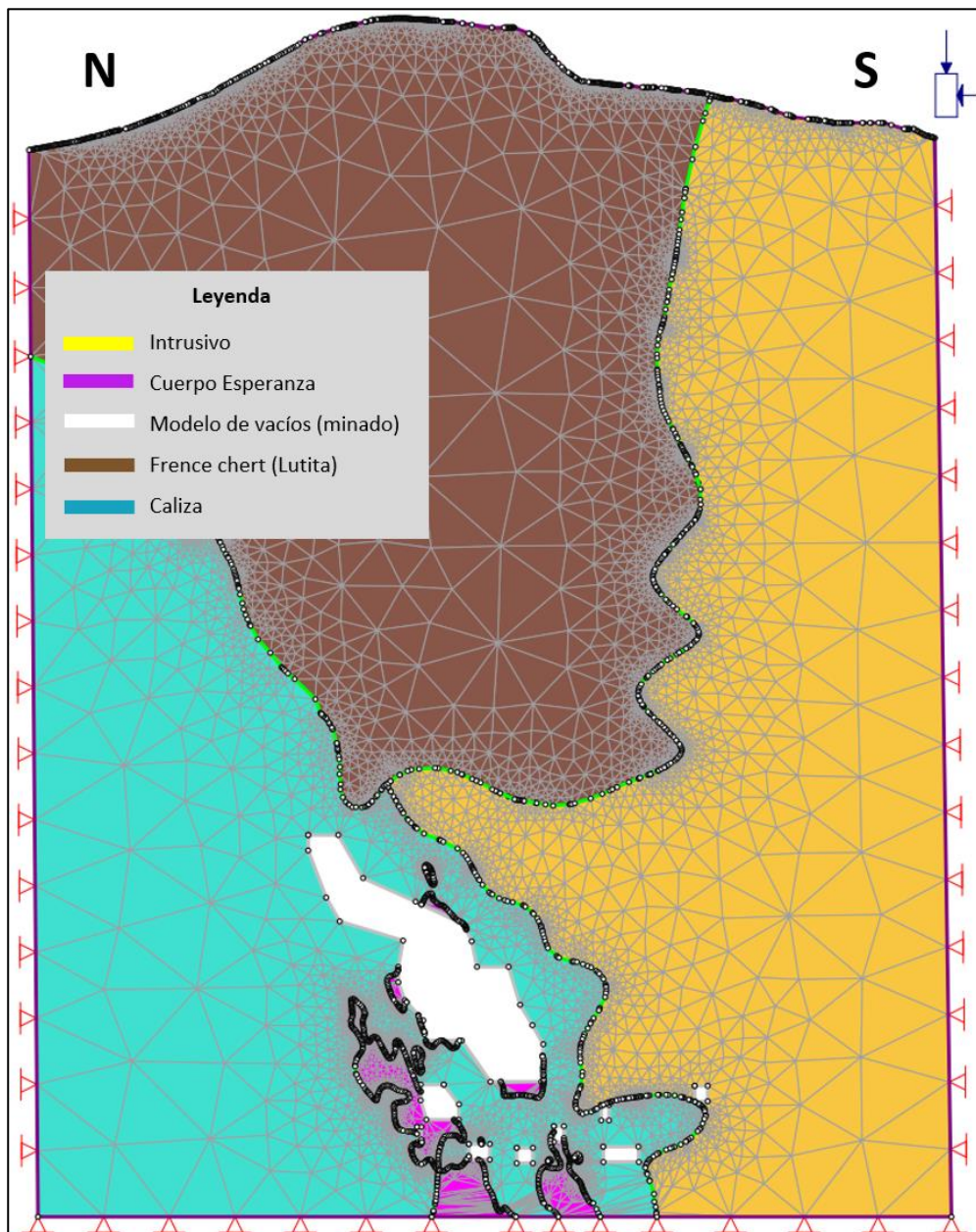


Fuente: Elaboración propia.



**Figura 74**

*Malla de elementos finitos de la sección A-A'*

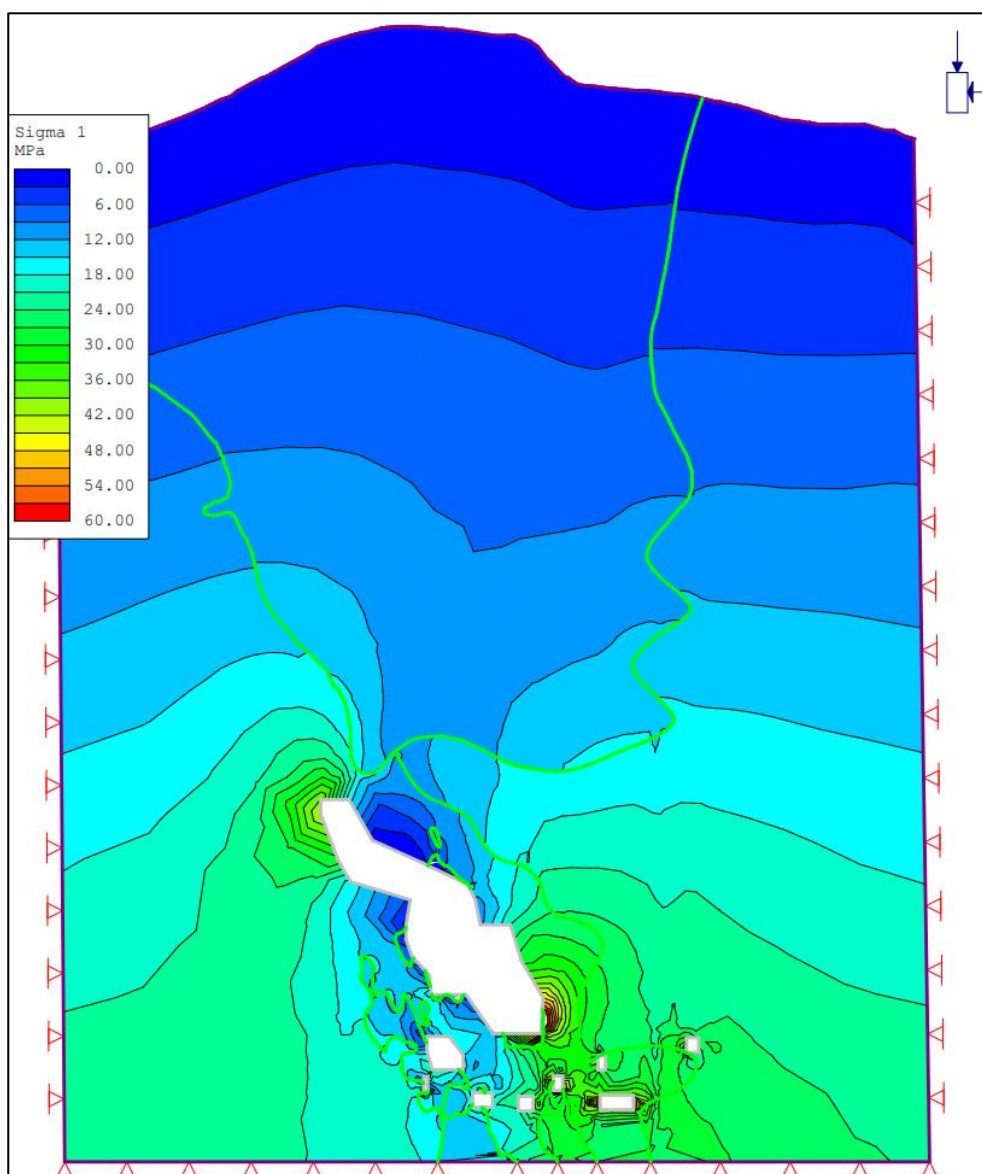


Fuente: Elaboración Propia.

En la figura 74, se visualiza la malla de elementos finitos junto con el modelo geométrico y los diferentes parámetros ingresados al software, además a diferencia de la figura 62, en este caso se le adiciona el modelo de vacíos el cual está representada de color blanco.

**Figura 75**

*Análisis del esfuerzo principal sigma 1 (MPa)*



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con el análisis, la influencia de las zonas vacías ocasionadas propiamente por el método de minado aplicado de Sublevel Caving flujo gravitacional, genera una acumulación de altos esfuerzos en las labores aledañas llegando a valores cercanos a 45 Mpa de esfuerzo principal sigma 1, y valores de hasta 60 Mpa en el contorno del caving. Este caso analizado es hipotético ya que, considerando la calidad del

macizo rocoso, el mecanismo de falla de la zona mineralizada y el principio del método de minado, el caving continua en ascenso de la bóveda formando un cono de subsidencia, para dicho análisis se interpretará el monitoreo de cable TDR.

#### **4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados**

Se realiza la interpretación el cable TDR, dichos cables están orientados, los cables TDR-01 y TDR-02 están instalados en proyección al Cuerpo Esperanza.

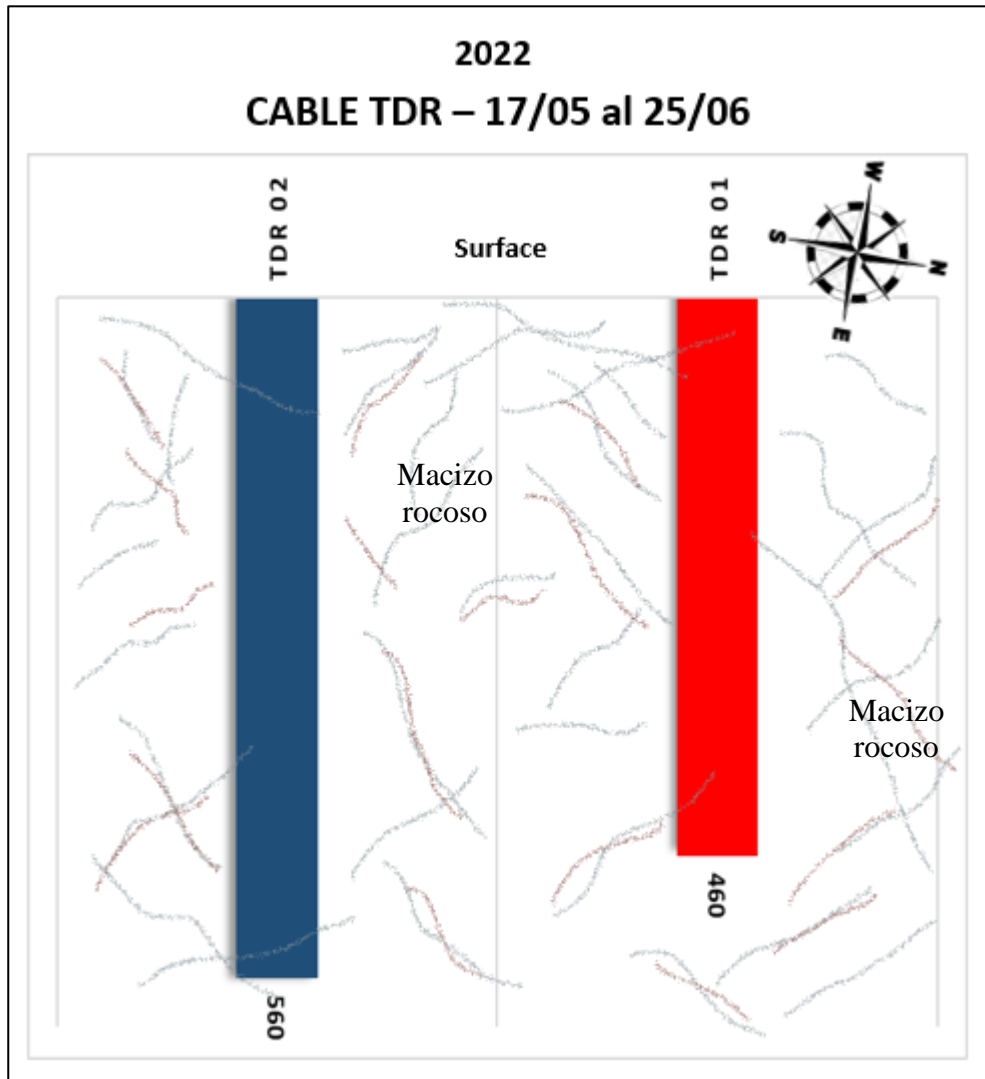
El monitoreo se realiza desde mayo del 2022, teniendo hasta la fecha actual (abril del 2023) se tienen cizallamientos detectados en el TDR-01 a los 342 m de profundidad (validado con data logger monitoreo en campo) interpretando el incremento de la bóveda por pérdida de 118 m de cable, por otro lado, el cable TDR-02 que está a una distancia de 40 m del TDR-01, presentó un cizallamiento a los 337 m de profundidad coincidiendo con el TDR-01.

La implementación del Cable TDR en la unidad minera Yauricocha se finalizó a mediados de mayo del 2022 con la instalación de dos cables TDR (TDR 01 y TDR 02), con el objetivo de monitorear el caving y subsidencia producida por el minado masivo del cuerpo mineralizado Esperanza desde el Nv.870 cuya cota es de 4038.1 ms.n.m. Desde mayo del 2022 hasta finales de Julio del 2023 se ha detectado 3 roturas significativas, a continuación, se detalla las diferentes roturas del cable con respecto al tiempo.



**Figura 76**

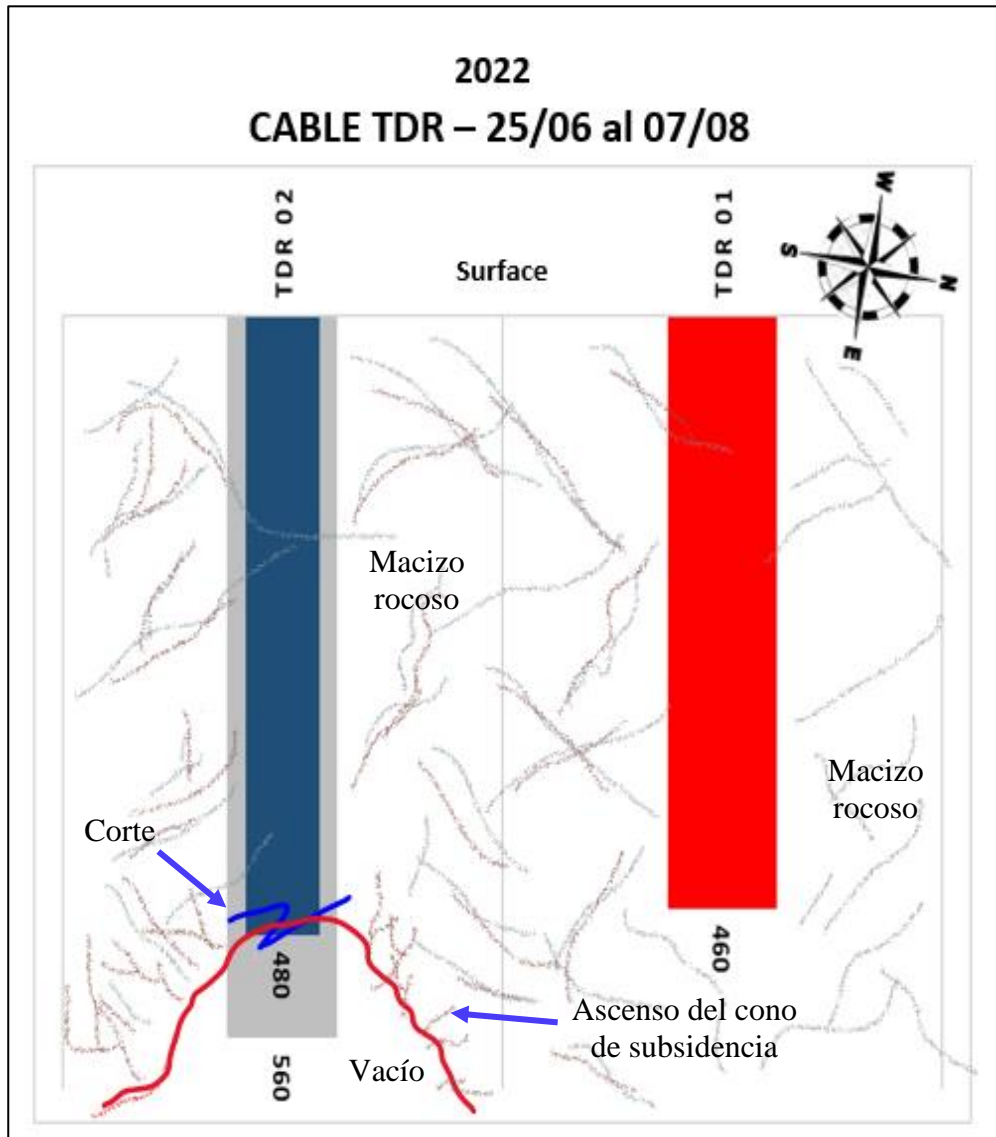
*Estado inicial de los cables TDR*



Fuente: Elaboración propia

**Figura 77**

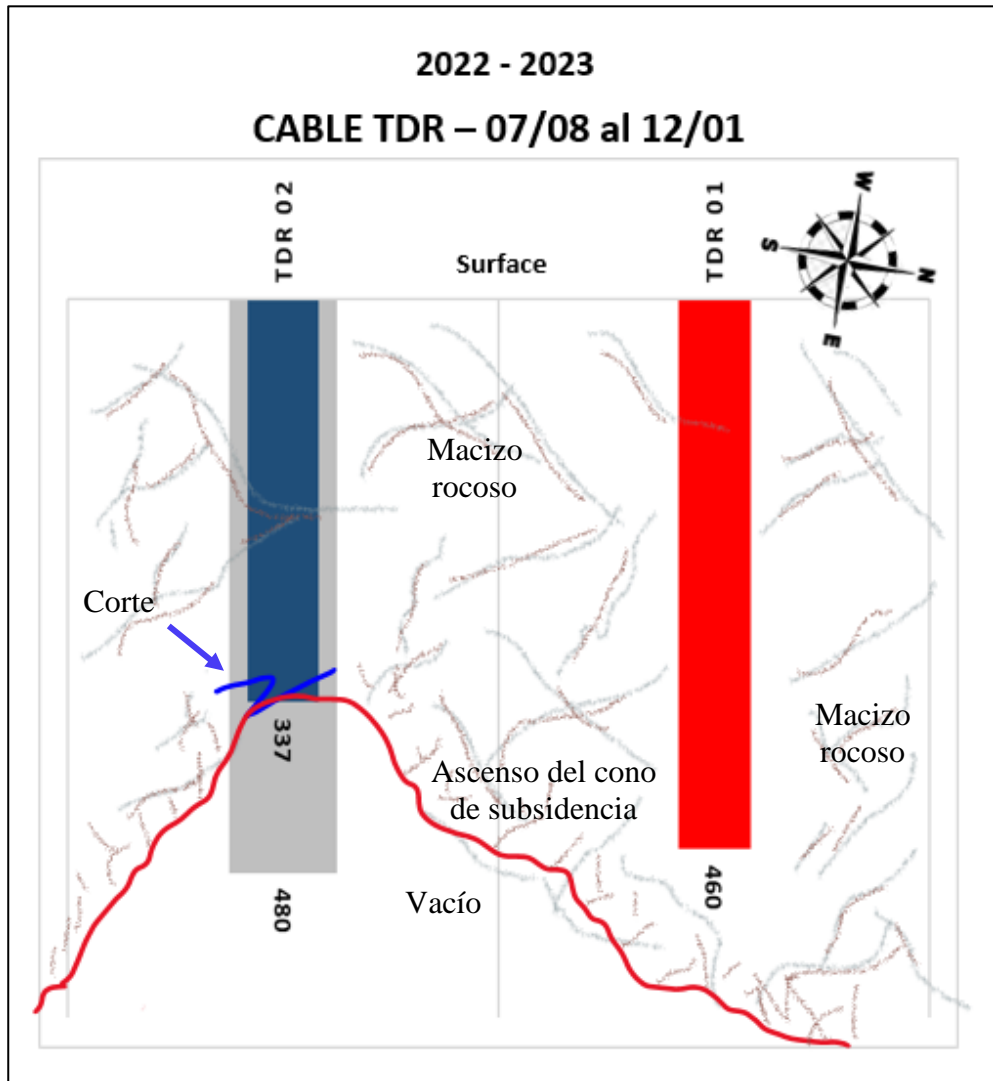
*Seccionamiento del cable TDR 02 (25/06/2022)*



Fuente: Elaboración propia

**Figura 78**

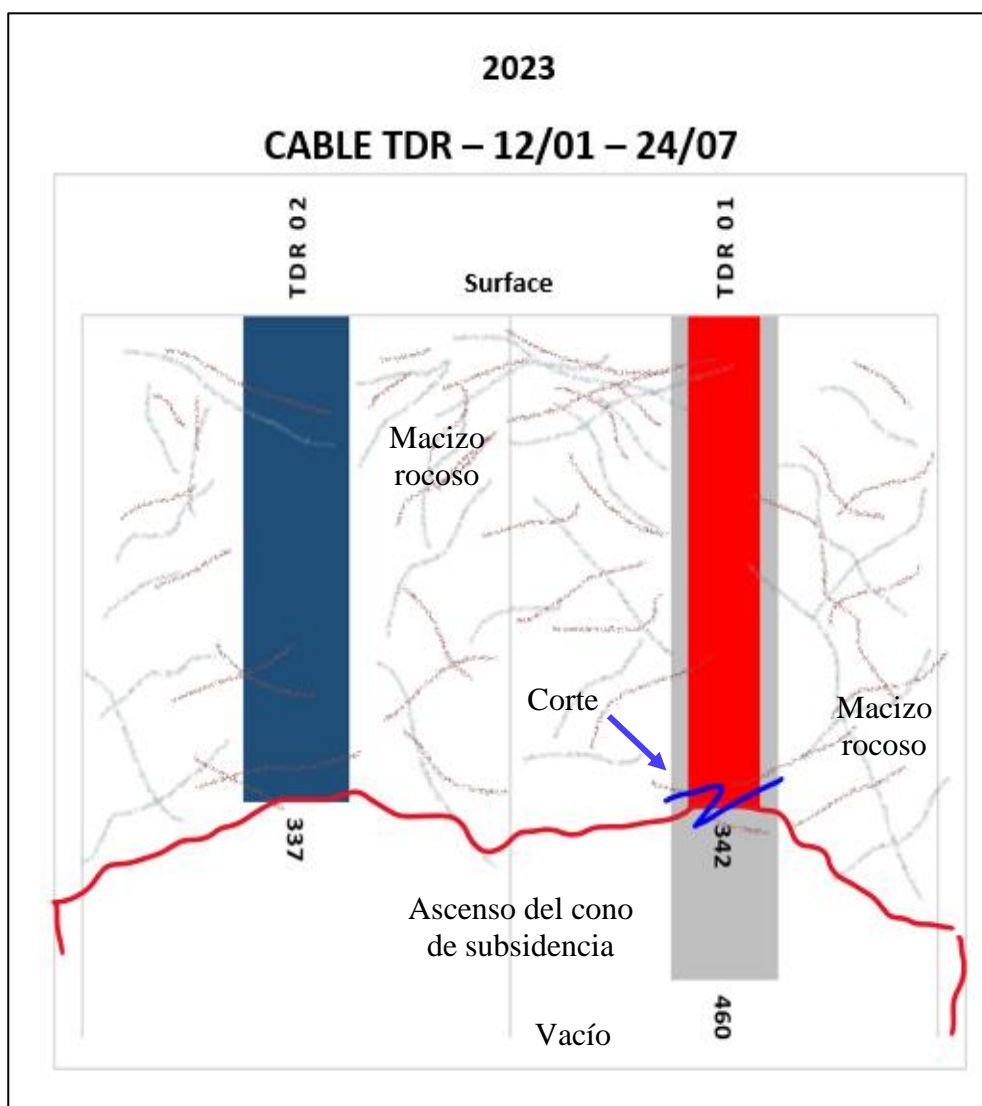
*Seccionamiento del cable TDR 02 (07/08/2022)*



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 79**

*Seccionamiento del cable TDR 01 (12/01/2023)*



Fuente: Elaboración propia.

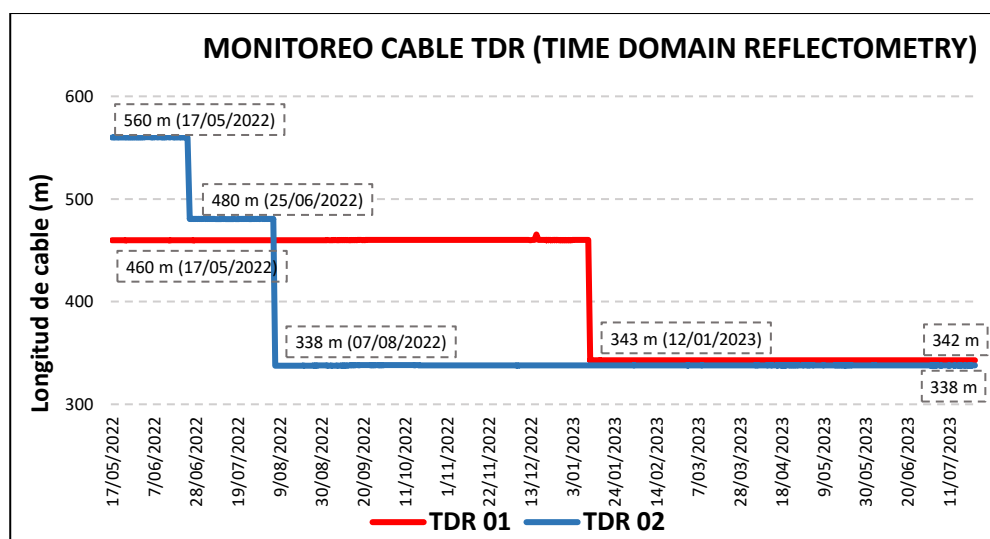
A continuación, se resume mediante gráficos el monitoreo histórico del cable TDR elaborado con los datos descargados de la plataforma CMT Edge y procesadas en Microsoft Excel, dicho gráfico presenta las fechas de cizallamiento a lo largo del tiempo y su análisis estadístico mediante el modelo de comparaciones de promedio.

Como ya se ha evidenciado, los datos que se toman como variable principal del estudio son de carácter cuantitativos (longitud) los cuales fueron

recolectados en una base de datos a partir de la descarga del monitoreo remoto. Por lo tanto, la estadística aplicada fue el de darle un promedio debido a la cantidad de datos emitidos por cada 2 horas (frecuencia de monitoreo) y así mismo considerando la fecha, dichos datos debido a que no hay un cambio significativo es el mismo, los datos promedios por día se presentan a continuación mediante el gráfico de líneas.

**Figura 80**

*Monitoreo de cable TDR con las fechas de seccionamiento.*



Fuente: Elaboración propia.

**Cuadro 7**

*Resultados del monitoreo de cable TDR*

RESULTADOS TDR 01				
FECHA	LONGITUD (m)	TIPO DE MONITOREO	VARIACIÓN (m)	FREC. DE MONITOREO
17/05/2022	460	Remoto	0	2hrs
12/01/2023	<b>343</b>	Remoto	-117	2hrs
RESULTADOS TDR 02				
FECHA	LONGITUD	TIPO DE MONITOREO	VARIACIÓN (m)	FREC. DE MONITOREO
17/05/2022	560	Remoto	0	2 hrs
25/06/2022	480	Remoto	-80	2 hrs
7/08/2022	<b>338</b>	Remoto	-142	2 hrs

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.1. Cálculo de hundibilidad del cuerpo Esperanza

Con base en los datos recopilados y el seguimiento continuo mediante el monitoreo de cable TDR, junto con la aplicación del método de minado de Sublevel Caving, se procede al cálculo de la hundibilidad utilizando el ábaco de Laubscher, (1994). Este método incorpora los valores de resistencia mecánica del macizo rocoso (MRMR) y el radio hidráulico adaptado específicamente para las condiciones actuales del minado del cuerpo mineralizado Esperanza.

- **Cálculo del Rock Mass Rating de Laubscher ( $RMR_{Lb}$ ):** Para el cálculo del RMR utilizaremos el método desarrollado por Laubscher, (1994). Para ello emplearemos la siguiente fórmula:

$$RMR_{Lb} = P(IRS) + P(FF, n \text{ o } RQD + JS) + P(CD)$$

Dónde:

- IRS: Resistencia de la roca intacta
- FF: Frecuencia de fracturas por metro lineal
- n: Número de sistema estructurales
- RQD: Rock Quality Designation
- JS: Espaciamiento entre Fracturas
- CD: Condición de las estructuras
- P: Puntaje asociado al parámetro

### Cuadro 8

*Cálculo de ISR y FF*

(1) PUNTAJES ASOCIADOS A LOS PARAMETROS QUE DEFINE EL RMR <sub>LB</sub>							Valor para los cálculos		
(a) Puntaje asociado a la resistencia de la roca intacta P(IRS)									
ISR (MPa)	1-4	5-11	12-24	...	165-185	>185	ISR =	12-24	
Puntuación	1	2	3	...	18	20		<u>3</u>	
(b) Puntaje asociado a la frecuencia de fracturas P(FF,n)							Valor para los cálculos		
FF/metro	0.1	0.15	0.2	...	20	30	40	FF/m	20
n=1	40			...	10	7	5	n=1	
n=2	40			...	7	5	2	n=2	
n=3	40		38	...	5	4	0	n=3	<u>5</u>

Fuente: Elaboración propia.

## Cuadro 9

### Condición de las discontinuidades

(b) Puntaje asociado a la condición de las discontinuidades						Valor para los cálculos	
P(CD) = A x B x C x D x 40			Discontinuidades abiertas o con rellenos no cementados			P(CD)	3.1
P(CD) = A x E x 40			Discontinuidades cerradas o con rellenos cementados				
Coeficiente y parámetro asociado	Descripción de la condición del parámetro	Coeficientes de ajuste A, B, C, D o E (ver primera columna)					
		Condición seca	Condición húmeda	Infiltraciones de agua			
				25-125 lt/min	> 125 lt/min		
A Sinuosidad	Sinuosa en varias direcciones (a)	1.00		0.97	0.93	d	0.8
	Sinuosa en una dirección (b)	0.95	0.92	0.80	0.87		
	Curva (c)	0.90	0.87	0.85	0.82		
	Ligeramente ondulada (d)	0.85	0.82	0.80	0.77		
	Recta (e)	0.80	0.77	0.75	0.72		
B Rugosidad	Escalonada, rugosa e irregular (a)	0.95	0.90	0.85	0.80	f	0.65
	Escalonada, lisa (b)	0.90	0.85	0.80	0.75		
	Escalonada, pulida (c)	0.85	0.80	0.75	0.70		
	Ondulosa y rugosa (d)	0.80	0.75	0.70	0.65		
	Ondulosa y lisa (e)	0.75	0.70	0.65	0.60		
	Ondulosa y pulida (f)	0.70	0.65	0.60	0.55		
	Plana y rugosa (g)	0.65	0.60	0.55	0.50		
	Plana y lisa (h)	0.60	0.55	0.50	0.45		
	Plana y pulida (i)	0.55	0.50	0.45	0.40		
C Alteración de la roca caja	No alterada (a)	1.0				c	0.65
	Alterada y más resistente que el relleno (b)	1.0					
	Alterada y más débil que el relleno (c)	0.75	0.70	0.65	0.60		
D Rellenos no cementados	Cizallado, duro, grueso (a)	0.90	0.70	0.80	0.75	f	0.35
	Cizallado, duro, medio (b)	0.85	0.85	0.75	0.70		
	Cizallado, duro, fino (c)	0.80	0.80	0.70	0.65		
	Cizallado, blando, grueso (d)	0.70	0.75	0.60	0.55		
	Cizallado, blando, medio (e)	0.60	0.65	0.50	0.45		
	Cizallado, blando, fino (f)	0.50	0.55	0.40	0.35		
	Salbanda arcillosa < Persistencia (g)	0.45	0.45	0.35	0.30		
	Salbanda arcillosa > Persistencia (h)	0.30	0.20	0.15	0.10		
E Rellenos cementados	Sin relleno (a)	1.00					
	Dureza > 5 (e.g. Anhidrita) (b)	0.95					
	Dureza de 3 a 4 (e.g. Calcita) (c)	0.90					
	dureza de 1 a 1 (e.g. Yeso) (d)	0.85					

Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, el resultado del “RMRLb” es:



## Cuadro 10

### Resultado RMRLb

PARÁMETRO	PUNTAJE
ISR	3
FF,n	5
RQD+JS	-
CD	3.1
<b>RMR<sub>LB</sub></b>	<b>11.1</b>

Fuente: Elaboración propia.

- **Cálculo del Mining Rock Mass Rating (MRMR):** Para el cálculo del MRMR utilizaremos el método desarrollado por Laubscher, (1994). Para ello emplearemos la siguiente fórmula:

$$MRMR = F_i, F_o, F_e, F_t, F_a \times RMR_{Lb}$$

Dónde:

- $F_i$ : Factor por intemperización
- $F_o$ : Factor por orientación de diaclasas
- $F_e$ : Factor por esfuerzos inducidos
- $F_t$ : Factor por voladura
- $F_a$ : Factor por agua
- $RMR_{Lb}$ : Clasificación del macizo rocoso de Laubscher

## Cuadro 11

### Cálculo de ISR y FF

(1) FACTOR POR INTEMPERIZACION - $F_i$						Valores cálculo	
Grado de intemperización	Tiempo de intemperización (años)					Fi =	0.5
	0.5	1	2	3	>= 4		
(2) FACTOR POR ORIENTACION DE ESTRUCTURAS - $F_o$						Valor para los cálculos	
Numero de bloques que definen la estructura	Numero de caras inclinadas respecto de la vertical						
	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90		
3	3		2				
4	4	3		2		4	4
5	5	4	3	2	1		
6	6	5	4	3	2.1		
(3) FACTOR DE ESFUERZOS INDUCIDOS - $F_e$						Valor para los cálculos	
Condición		Factor de Ajuste					
Esfuerzos de gran magnitud normales al plano de las estructuras		1.20					1.2
Esfuerzos de gran magnitud casi paralelos al plano de estructuras		0.70					
En caso de desconocer la situación		RMR <sub>LB</sub> "normal" / RMR <sub>LB</sub> "Altos esfuerzos"					
(3) FACTOR DE VOLADURA – $F_t$						Valor para los cálculos	
Tipo de Voladura		Factor de Ajuste					
Excavación mecánica, sin voladura		1.00					
Voladuras controladas		0.97					0.97
Voladuras convencionales de buena calidad		0.94					
Voladuras de mala calidad		0.80					
(4) FACTOR POR AGUA - $F_a$						Valor para los cálculos	
Condición		Factor de Ajuste					
Macizo rocoso seco		1					
Macizo rocoso húmedo		0.95 - 0.90					0.90
Infiltraciones de 25 a 125 litros/minuto con presiones de 1 a 5 MPa		0.90 - 0.80					
Infiltraciones de > 125 litros/minuto con presiones de > 5 MPa		0.70 - 0.80					

Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, el resultado del “MRMR” es:

## Cuadro 12

### Resultado MRMR

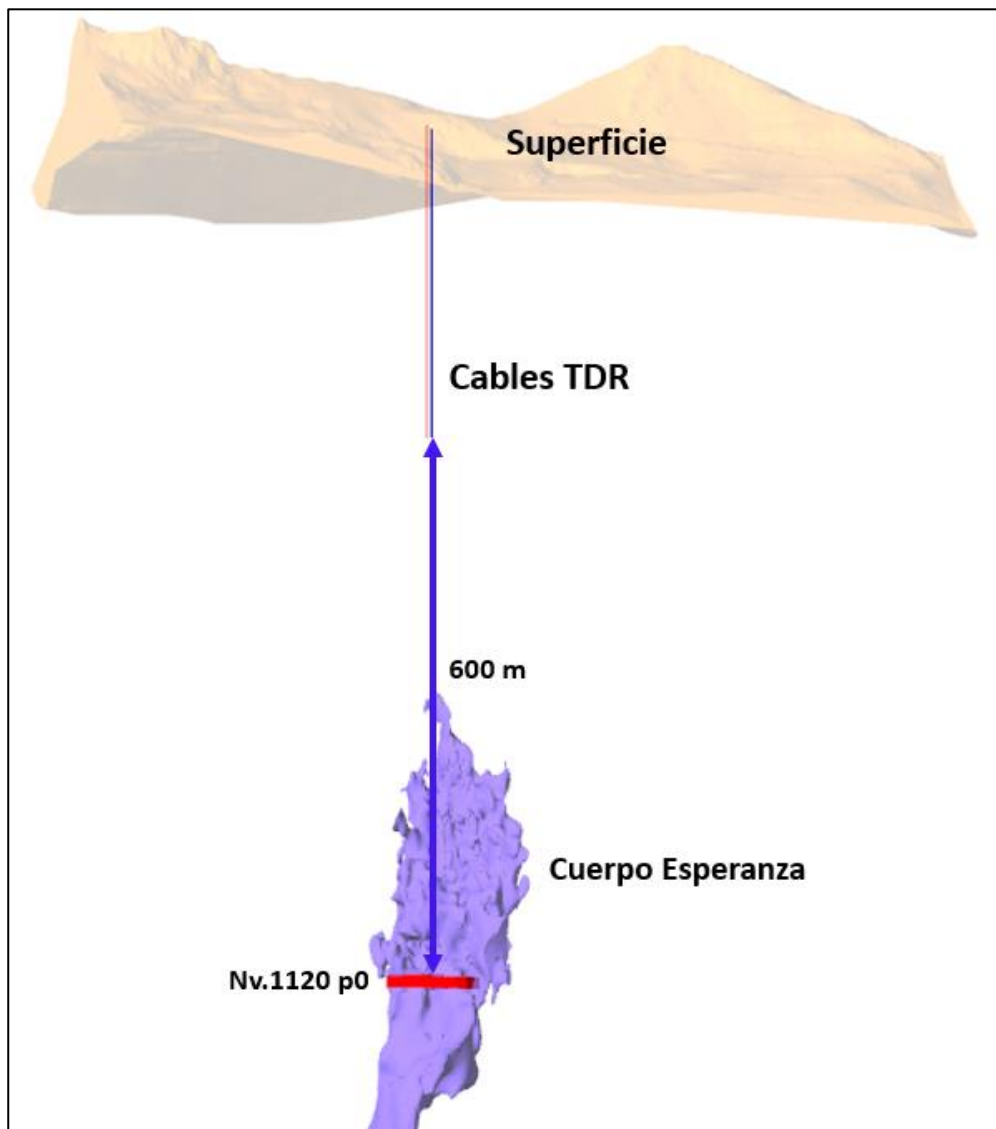
Parámetro	Puntaje
$F_i$	0.5
$F_o$	1.2
$F_e$	1.2
$F_t$	1.0
$F_a$	0.9
$RMR_{LB}$	11.1
<b>MRMR</b>	<b>7.0</b>

Fuente: Elaboración propia.

- **Cálculo del Radio Hidráulico:** Para el presente estudio se realizará dos casos de radio hidráulico, uno en la que se somete a condiciones de minado por subnivel con una altura de banco de 16.5 metros (longitud subnivel a subnivel) y la otra asumiendo la columna del caving desarrollado a lo largo de los años (altura total de vacíos tomando como dato el monitoreo de cable TDR sin consideración del auto relleno).

**Figura 81**

*Altura total de vacío asumido, cuerpo Esperanza*



Fuente: Elaboración propia.

### Cuadro 13

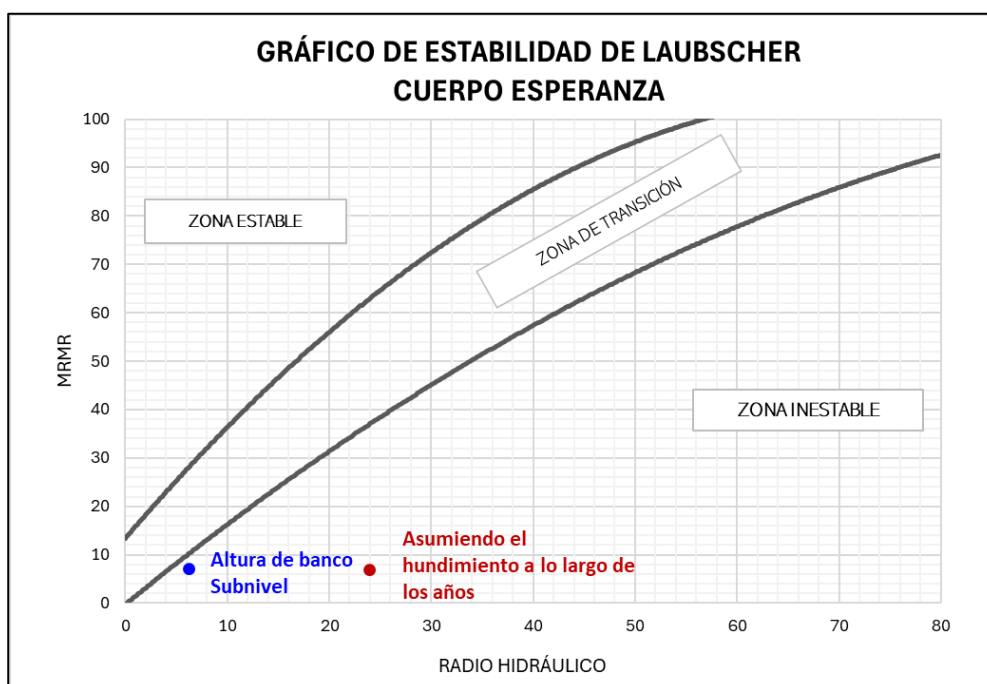
#### Cálculo del Radio Hidráulico

Techo	Altura (m)	Largo (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Perímetro (m)	R.H (m)
Techo Subnivel	16.6	52.0	863.2	137.2	6.3
Techo Caving	600.0	52.0	31,200.0	1,304.0	23.9

Fuente: Elaboración propia.

### Figura 82

#### Ábaco de Laubscher para definir radio hidráulico en caso de caving



Fuente: Elaboración propia.

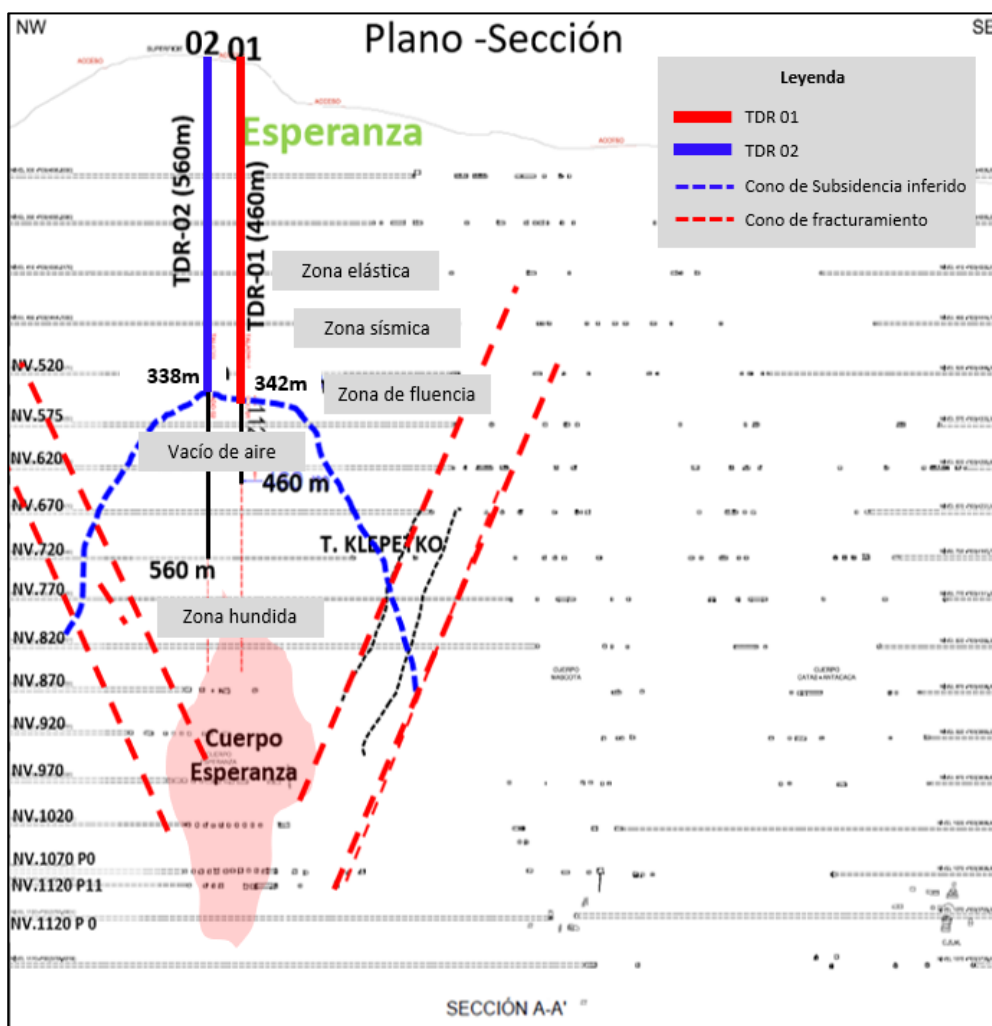
Por lo tanto, el ábaco superior demuestra y busca hacer entender con el comportamiento del macizo rocoso del Cuerpo Esperanza, donde el Radio Hidráulico y MRMR por las condiciones de la roca y corroborado con el logueo geotécnico de la roca que es de baja calidad con valores de RMR = 20 - 25, que el proceso de hundimiento no permitirá la formación de estructuras grandes y estables, sino que resultará en el desprendimiento y fragmentación de rocas sobre el cuerpo mineralizado.

#### 4.2.2. Interpretación del monitoreo de cable TDR en el cono de Subsistencia

- **Modelo conceptual:** Para la construcción del modelo conceptual únicamente se ha tomado como dato el ascenso de la bóveda del cono de subsistencia a partir del monitoreo de cable TDR, para lo cual se ha realizado un corte longitudinal del laboreo existente.

**Figura 83**

*Modelo conceptual del cono de subsistencia*

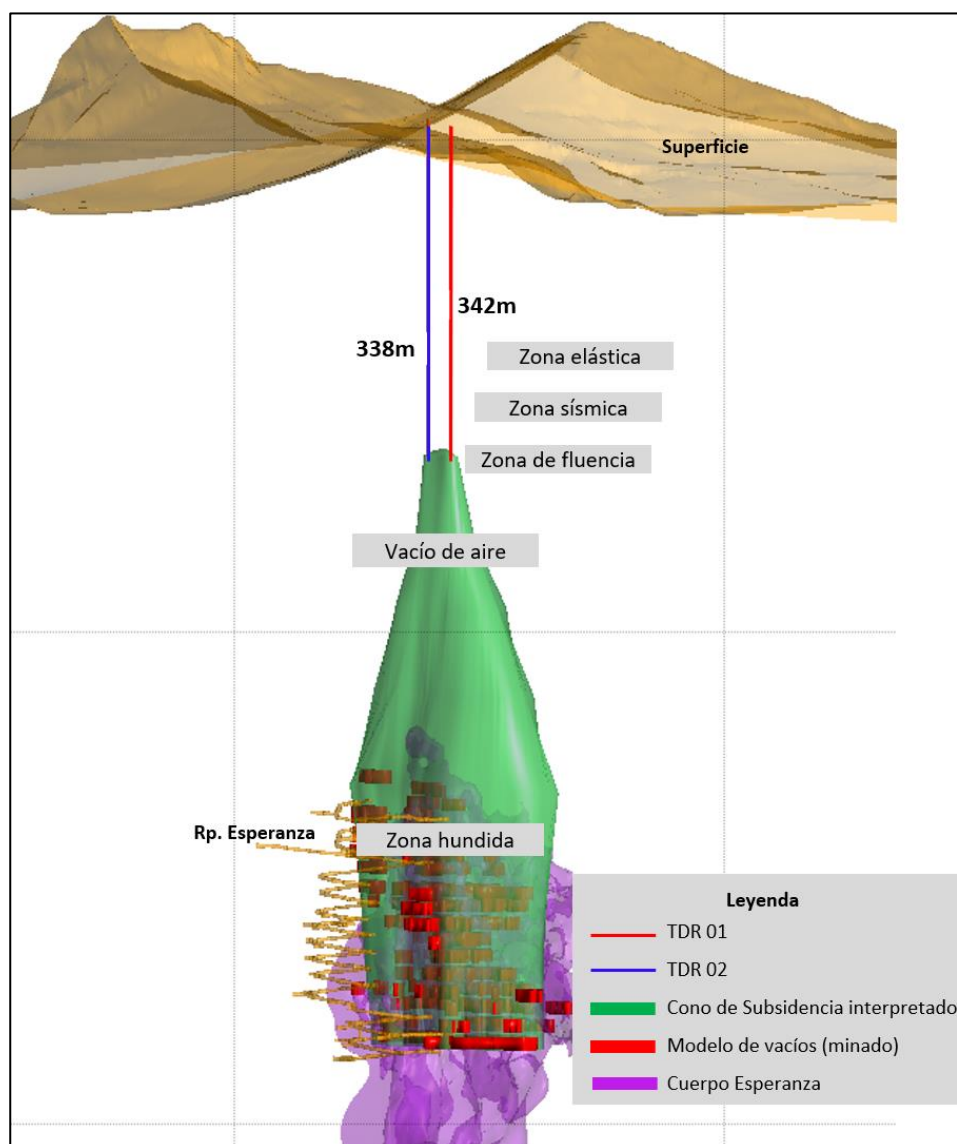


Fuente: Elaboración propia.

- **Modelo 3D:** En el caso del modelo 3D se ha tomado la información topográfica (zonas minadas) que ya se ha modelado y explicado en la descripción de trabajos, además se ha tomado como dato clave el monitoreo de cable TDR ya que se interpreta hasta dónde llega la bóveda del cono de subsidencia.

**Figura 84**

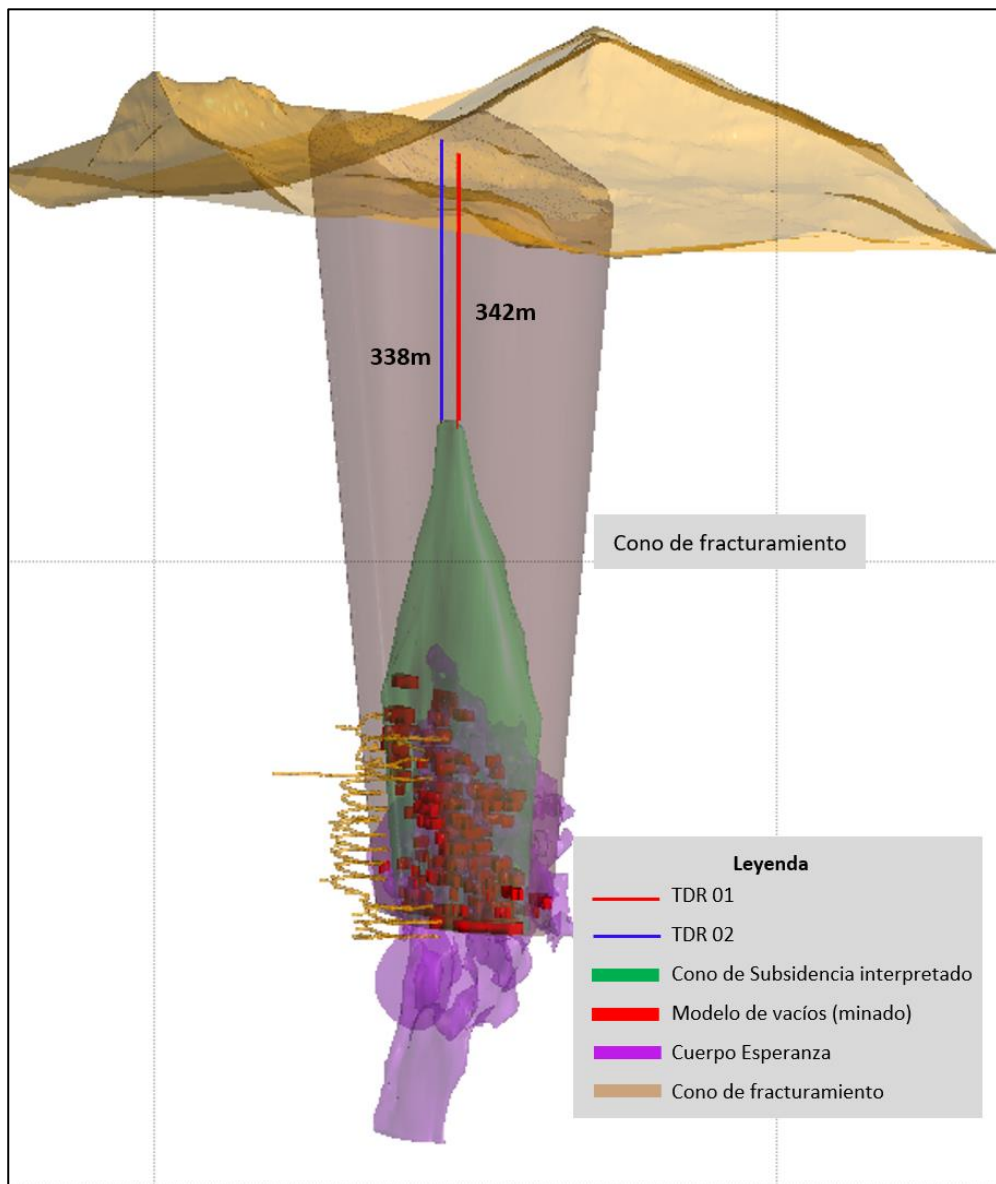
*Modelo 3D del cono de subsidencia*



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 85**

*Modelo 3D del cono de fracturamiento*



Fuente: Elaboración propia.

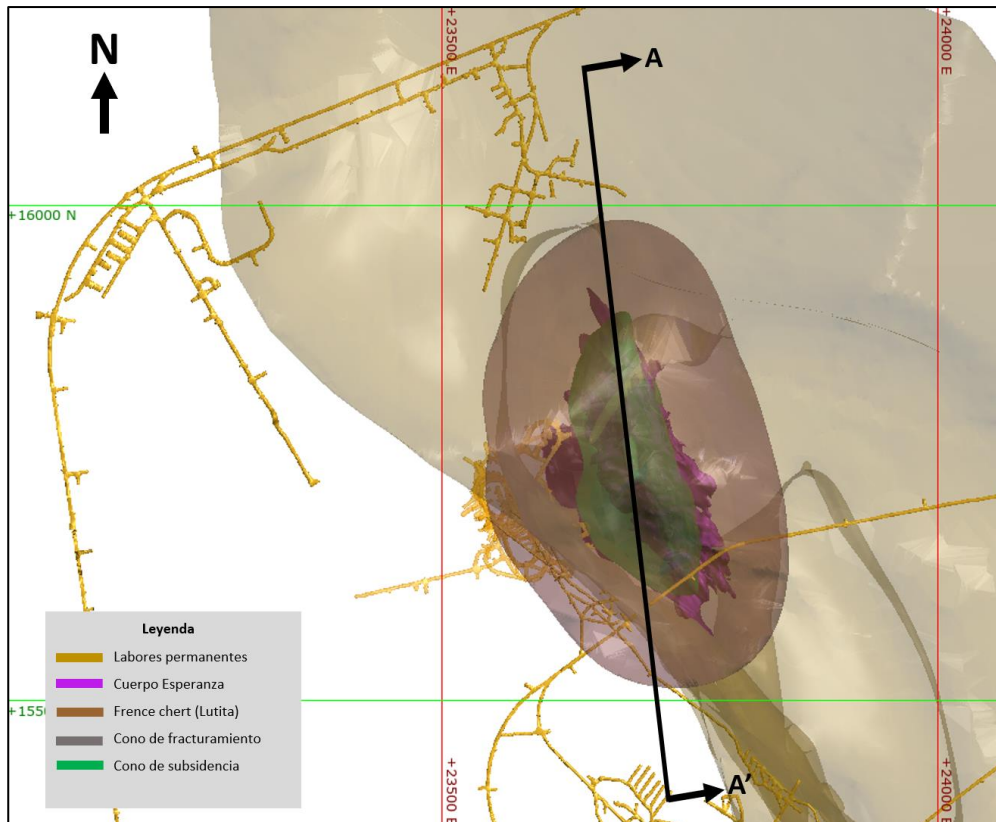
El cono de fracturamiento se ha construido en base a la zona más profunda de minado y su influencia con los pisos superiores hasta superficie en el cual se ha evidenciado formación de grietas, con este input se podrá diseñar proyectos fuera del cono de fracturamiento con el objetivo de que este no sea afectado a largo plazo.



- **Modelamiento numérico 2D:** Para el modelamiento numérico se realizó un corte longitudinal A-A' de los cables TDR y con ello todo lo que está alrededor de este, labores subterráneas permanentes (Nv.720), modelo de vacíos y unidades geotécnicas. A continuación, se presenta la figura 86 el cuál es el corte principal (modelo geométrico) para el modelamiento numérico 2D.

**Figura 86**

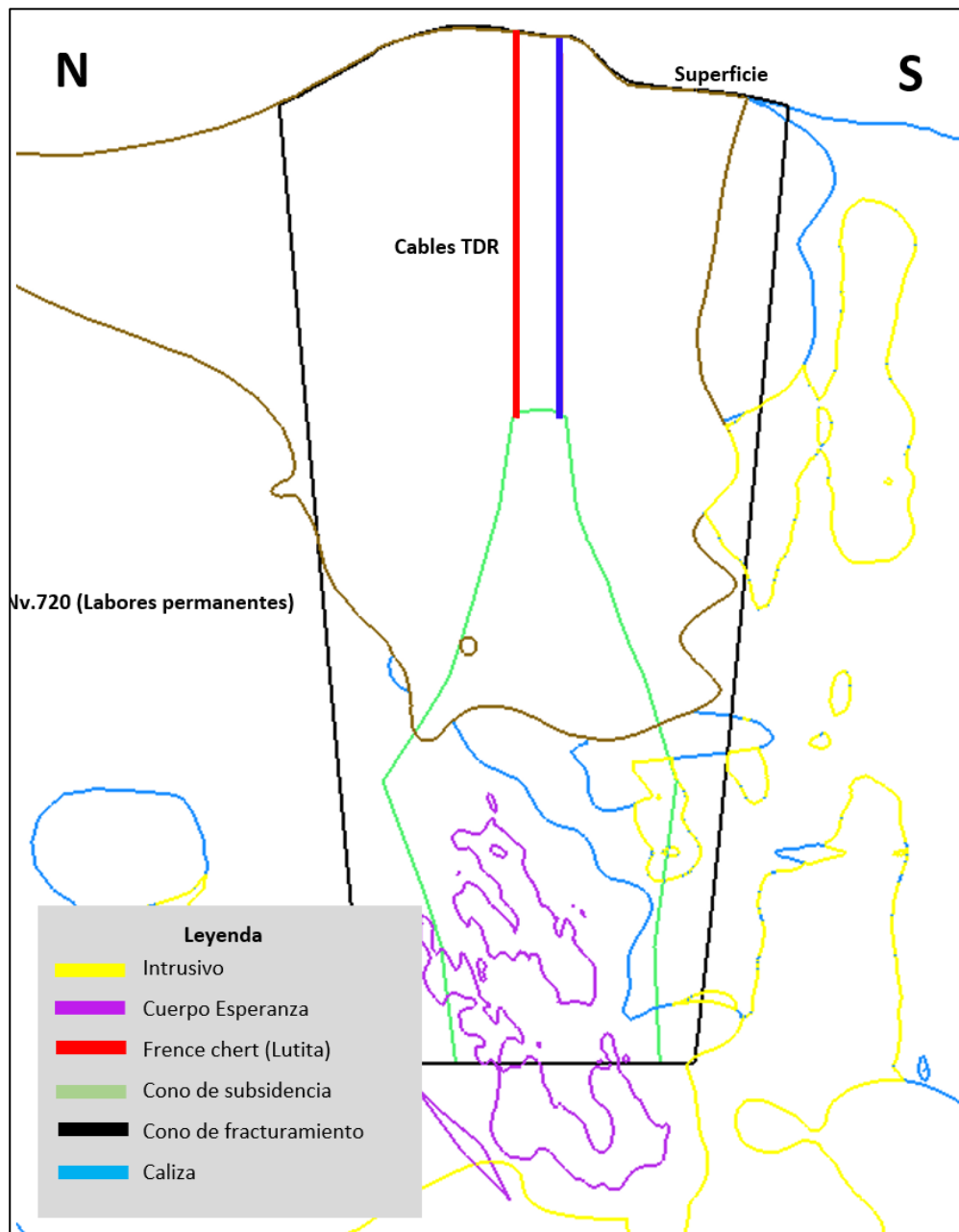
*Línea de corte de la zona de interés A-A'*



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 87**

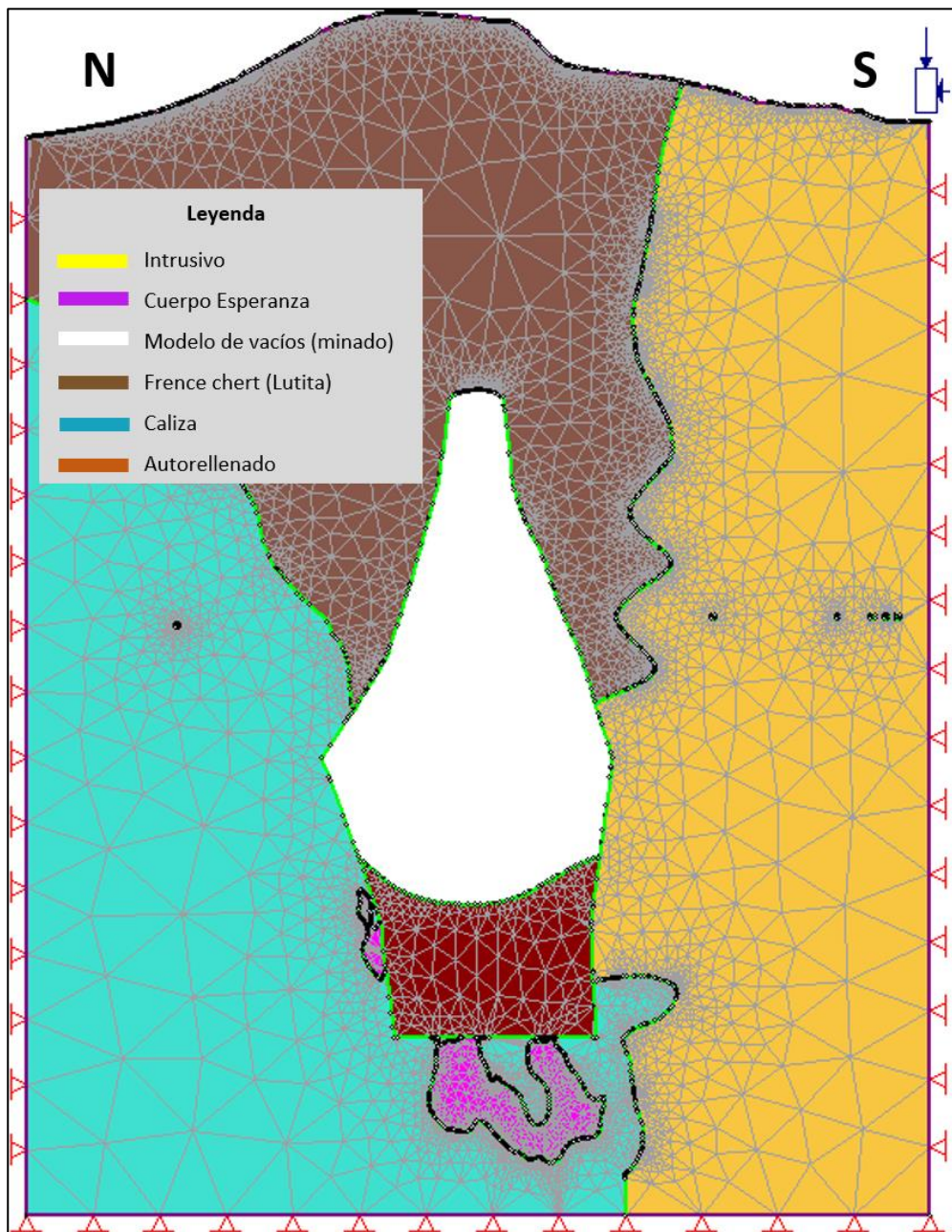
*Corte longitudinal A-A'*



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 88**

*Malla de elementos finitos del cono de subsidencia*



Fuente: Elaboración propia.

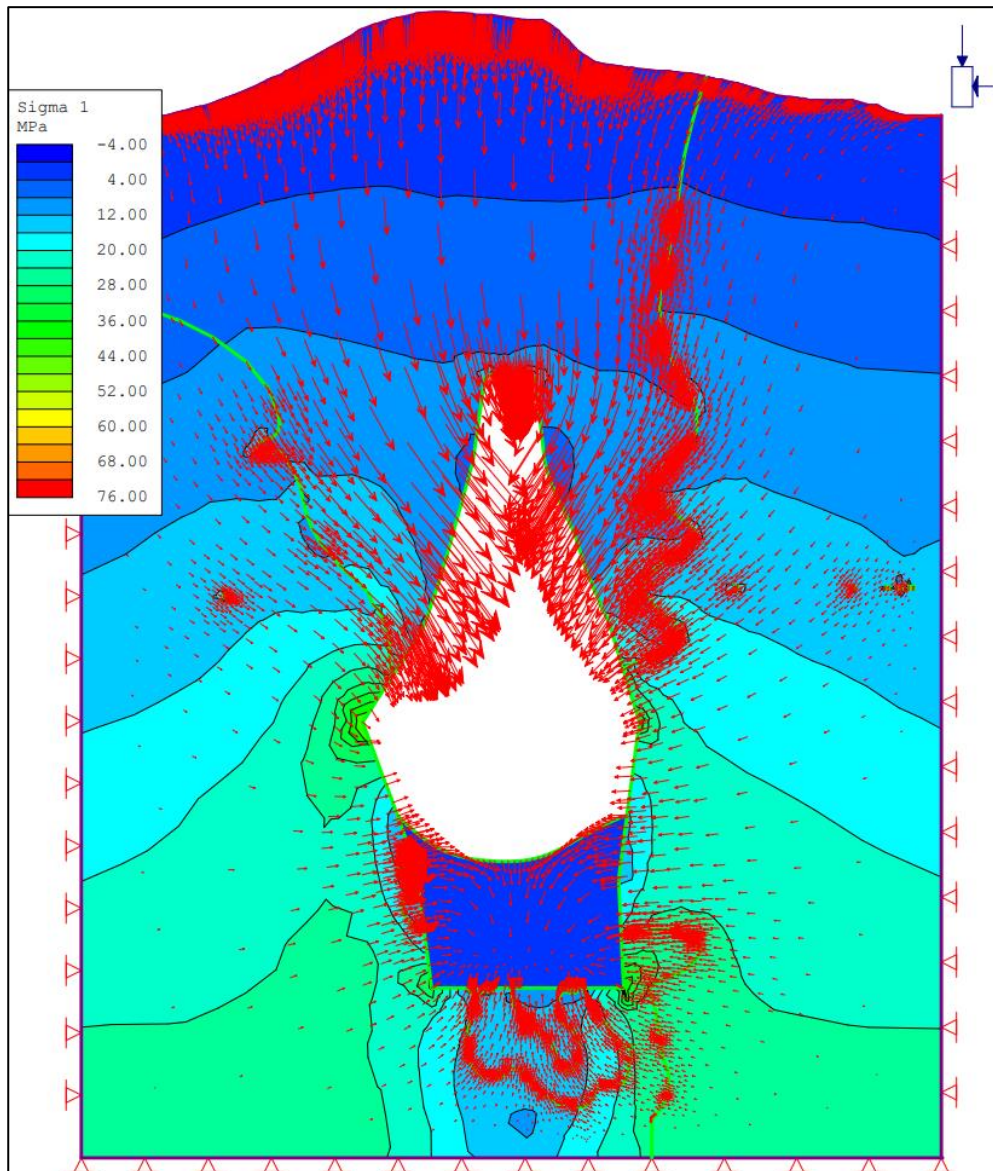
En la figura 88 se visualiza la malla de elementos finitos junto con el modelo geométrico y los diferentes parámetros ingresados al software, además a diferencia de la figura 75, en este caso se le adiciona el cono de subsidencia considerando una zona de vacíos y otra de auto relleno producto del material que



ha descendido por el ascenso progresivo del vacío, a continuación, se presenta los resultados del modelamiento numérico para la simulación del esfuerzo principal inducido.

**Figura 89**

*Esfuerzo principal Sigma 1 – Cono de Subsidencia*



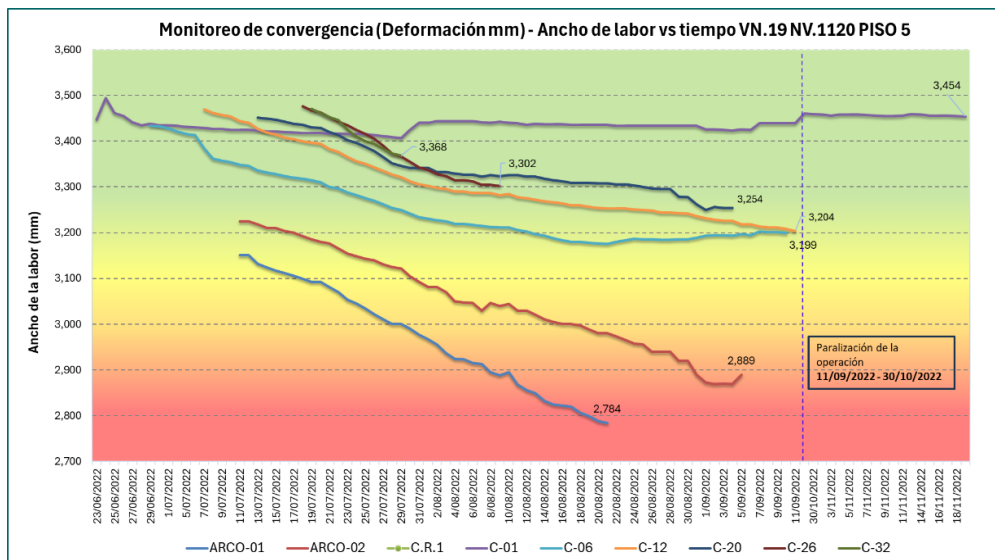
Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, según el análisis del esfuerzo sigma 1, inicialmente se tenía un valor de 31Mpa en estado insitu (ver figura 71), luego se incrementó en un 94% dando un valor de 60Mpa y finalmente al interpretar con el monitoreo de

cable TDR se incrementó en un 27% teniendo un valor final de 76Mpa. El incremento de esfuerzos al aplicar el método de minado de Sublevel Caving va en crecimiento de acuerdo con la tasa de producción y al crecimiento del cono de subsidencia lo cual ocasiona que la deformación en las labores aledañas sea muy alta y que estas requieran de un sostenimiento más robusto y de mayor costo, además se observa la dirección de la deformación lo cual genera un descenso superficial (subsistencia).

**Figura 90**

*Deformación de las cimbras en las labores de explotación*



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 90, se observa la alta deformación de las cimbras producto del minado y la influencia del caving, ocasionando que se refuerce el sostenimiento en diferentes puntos en las labores de explotación.

## Cuadro 14

### Resultados finales interpretación cable TDR

TDR 01				
FECHA	TDR (m) & CROWN PILLAR (m)	ALTURA CAVING (m)	ESFUERZO PRIN. (Mpa)	PRODUCCIÓN (tn/día)
17/05/2022	460	385	60	3,500
12/01/2023	343	593	76	2,500
TDR 02				
FECHA	TDR & CROWN PILLAR (m)	ALTURA CAVING (m)	ESFUERZO PRIN. (Mpa)	PRODUCCIÓN (tn/día)
17/05/2022	560	376	60	3,500
25/06/2022	480	456	68	4,000
7/08/2022	338	598	76	4,000

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.3. Gestión de riesgos geotécnicos

En caso de corte o seccionamiento del cable TDR mayor a los 15 metros, se tiene riesgos de:

- **Pistón de aire (Air blast):** Genera debilitamiento de las excavaciones subterráneas por lo que podría ocasionar derrumbes.
- **Deslizamiento de lodo (Soplo):** La caída de grandes volúmenes de macizo y al combinarse con agua subterránea podría ocasionar la expulsión de material saturado por las ventanas de explotación.

Para estos casos se toma decisiones de alertar al personal de acuerdo con el nivel de criticidad.

**Tabla 13**

*Protocolos de seguridad en base al monitoreo de cable TDR*

RESPUESTA	CRITERIO	CONDICIÓN	ACCIÓN
	Longitud del cable		
<b>Nivel 1</b>	Los cables TDR no presentan ningún cambio y mantienen su longitud inicial.	Normal	Continuar con el monitoreo normal con una frecuencia diaria.
<b>Nivel 2</b>	Los cables TDR presentan una lectura incoherente (longitud de cable mayor al monitoreo anterior) y validado con el monitoreo en campo.	Preventivo	Alertar y/o comunicar a la Gerencia de Operaciones
			Hacer reportes para que el área de operaciones mina del cuerpo esperanza tenga conocimiento que la rotura puede ocurrir en cualquier momento. Difundir al personal de interior mina a la supervisión y colaboradores.
<b>Nivel 3</b>	Los cables TDR presentan corte o cizallamiento mayor a 15 metros y este es evidenciado tanto en el monitoreo del Getaway y validado con Datalogger en campo	Crítico	Realizar el análisis e interpretación de los datos mediante gráficos y modelamientos. Monitorear de manera permanente.
			Comunicación a la Gerencia de operaciones y alta gerencia para activar el plan de contingencia.
			Evacuar al personal que se encuentra en las labores de explotación de interior mina por un periodo de 4 horas hasta validar con una inspección en las labores superiores y adyacentes del minado SLC.
			Verificar posibles indicios de soplo mediante los controles de gestión de riesgo para SLC.

Fuente: Departamento de geomecánica SMCSA.

### **4.3. Prueba de Hipótesis**

El presente trabajo de investigación en la interpretación del monitoreo de cable TDR en el cono de subsidencia ocasionado por la explotación del Cuerpo Esperanza mediante el método de Sublevel Caving, por lo tanto, para analizar, monitorear y controlar las condiciones del cono de subsidencia, se ha realizado el estudio geomecánico del Cuerpo Esperanza para mejorar la efectividad de la interpretación del monitoreo con Cable TDR.

#### **4.3.1. Prueba de Hipótesis general**

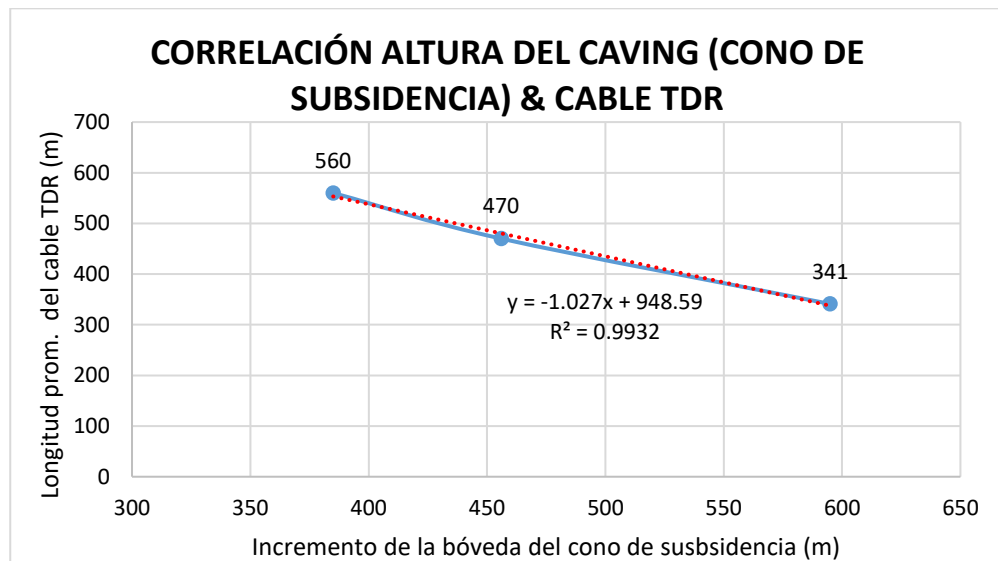
**“La interpretación del monitoreo de cable TDR influye directamente en el control del cono de subsidencia del Cuerpo Esperanza en la U.M Yauricocha”**

De acuerdo con el análisis de los resultados del monitoreo (ver figura 84) y su interpretación aplicada a la estructura mineralizada, se ha logrado construir un modelo 3D del crecimiento del cono de subsidencia. Este crecimiento se debe a que, a medida que el cable TDR se acorta, la altura del caving aumenta. Por lo tanto, existe una correlación directa entre la longitud del cable TDR y el ascenso progresivo de la bóveda del cono de subsidencia. De esta manera, es posible controlar el crecimiento del cono y tomar decisiones informadas para gestionar las condiciones de riesgo. A continuación, se presenta el gráfico que muestra esta correlación:



**Figura 91**

*Correlación del cable TDR en el monitoreo del caving*



Fuente: Elaboración propia.

#### **4.3.2. Prueba de hipótesis específicas**

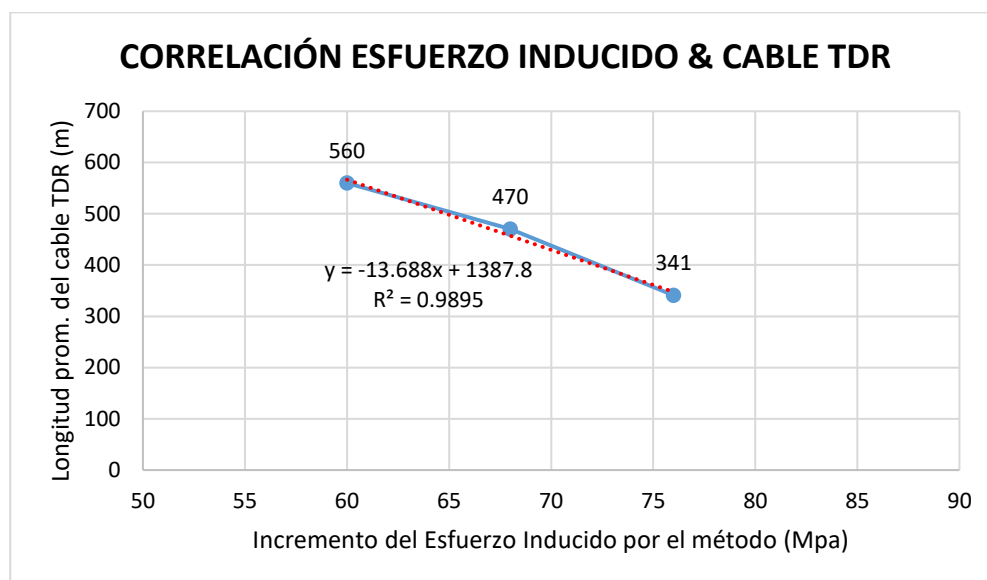
##### **Hipótesis específica 1**

**“La interpretación del monitoreo de cable TDR tiene relación directa con los esfuerzos inducidos por el método de minado Sublevel Caving”**

De acuerdo con el análisis de las figuras 71 y 75, se puede observar un incremento de los esfuerzos inducidos tanto en estado in situ como en condiciones de abertura por el minado a lo largo de los años. Finalmente, con la interpretación del monitoreo de cable TDR y el uso del modelamiento numérico (ver figura 89), se evidencia que los esfuerzos inducidos alcanzan una magnitud mayor en comparación con los casos anteriores. A continuación, se presenta el análisis de correlación:

**Figura 92**

*Correlación hipótesis específica 1*



Fuente: Elaboración propia.

Según la figura 92, el monitoreo de cable TDR tiene una relación directa con los esfuerzos inducidos, dado que el TDR nos brinda información de la altura del caving, si el cable se acorta se interpreta que el ascenso de la bóveda del cono de subsidencia asciende entonces el esfuerzo principal también crecerá en la zona afectada por el cono de subsidencia, siendo las de mayor valor en las labores más profundas.

### **Hipótesis específica 2**

**“Si se interpreta correctamente los datos del monitoreo de cable TDR, entonces se tomará decisiones efectivas en aspectos de seguridad en la gestión de riesgos geotécnicos”**

La hipótesis específica 2 queda demostrada, ya que, de acuerdo con el análisis del monitoreo de cable TDR, la construcción del modelo de subsidencia y el modelamiento numérico de los valores del esfuerzo principal, se puede gestionar correctamente los riesgos a los que está

expuesta la unidad minera. En consecuencia, se sabe que cuando el cable TDR se acorta, tanto el caving como los esfuerzos aumentan en tamaño y magnitud, lo que provoca desprendimientos de grandes volúmenes del macizo rocoso. Esto permite tomar decisiones oportunas para salvaguardar la integridad de los trabajadores, aplicando las acciones dependiendo al nivel de criticidad explicado en la tabla 13.

#### **4.4. Discusión de resultados**

El objetivo principal del presente trabajo de investigación fue “Interpretar el monitoreo de cable TDR para el control del cono de subsidencia del Cuerpo Esperanza de la U.M Yauricocha”; para el cual consideré que entender el método de minado y la geomecánica de la estructura mineralizada y zonas aledañas era de vital importancia. Para el cual, he planteado la siguiente hipótesis: “La interpretación del monitoreo de cable TDR influye directamente en el control del cono de subsidencia del Cuerpo Esperanza en la U.M Yauricocha”.

Para poder obtener resultados de interpretar se ha tenido en cuenta lo siguiente: Trabajos de campo los cuales fueron inspecciones de los diferentes niveles en los que se aplicó el método de minado, se verificó el estado del laboreo aledaño y así mismo cercano a las ventanas de explotación cumpliendo las pautas de seguridad ya que es de alto riesgo acceder a dichas zonas, se realizó monitoreos in-situ del cable TDR para verificar con exactitud la longitud actual del cable, se realizaron mapeos estructurales, mapeos geomecánicos, envío de muestras para los ensayos de laboratorio con el fin de conseguir las constantes elásticas, la resistencia a la compresión de la roca y poder determinar el incremento del esfuerzo principal inducido por el método de minado.

Por otro lado, se han realizado trabajos de gabinete los cuales fueron: Caracterización del macizo rocoso, análisis de las discontinuidades, modelamiento en 3D de las zonas de minado en Esperanza, control de monitoreo de cable TDR día a día en el programa Excel de Microsoft office y modelamiento numérico 2D del cuerpo esperanza de la zona de interés. Todo lo explicado se ha realizado recopilando información importante de áreas como geología, planeamiento, mina e información preexistente del área de geomecánica. Al completar todos estos trabajos mencionados se logró interpretar el monitoreo de cable TDR para el control del cono de subsidencia, donde se obtuvieron los siguientes resultados.

#### **4.4.1. Contornos de minado, cono de subsidencia y fracturamiento de Esperanza**

Se tiene 54 contornos de minado desde el nivel 870 piso 4 al nivel 1120 piso 0, con la interpretación de este y el monitoreo de cable TDR se construyó el cono de subsidencia y finalmente se consiguió el cono de fracturamiento el cual nos ayuda a ubicar los proyectos de labores permanentes en zonas adecuadas.

#### **4.4.2. Histórico de monitoreo de cable TDR**

Se tuvo 3 cortes el cual te indica la ubicación exacta con respecto a la superficie del ascenso de la bóveda del caving, además, se tiene 350m de Crown Pillar.

#### **4.4.3. Esfuerzo principal sigma 1 influyente en el Cuerpo Esperanza**

Los esfuerzos inducidos por Sublevel Caving llega a valores de hasta 60 Mpa en los contornos del caving, interpretando con el monitoreo de cable TDR llega hasta valores de 76 Mpa.

#### **4.4.4. Protocolos de seguridad en base al monitoreo de cable TDR**

Debido a que los cambios de longitud muestran que hay movimiento y/o caída de grandes volúmenes de macizo rocoso, por lo tanto, se toma la decisión de alertar al personal que labora en interior mina por los riesgos asociados.

## CONCLUSIONES

- El monitoreo de cable TDR ayuda a controlar el ascenso de la bóveda del cono de subsidencia, desde el inicio de monitoreo hasta la fecha de investigación del estudio se ha detectado 3 cortes por lo que se asume que el cono de subsidencia está creciendo de manera progresiva, el cual ocasionará problema de estabilidad en la superficie tendiendo como consecuencia, agrietamiento, pérdida de infraestructura cercana, descenso de la cota superficial, entre otros.
- De acuerdo con la caracterización de macizo rocoso de la zona de Esperanza, se concluye que el RMR cercano a la mineralización varía de entre 21-35 teniendo macizos rocosos Tipo IVA y IVB, la resistencia a la compresión simple de la caliza alterada cercana al cuerpo es en promedio de 58 Mpa, mineral de 34 Mpa, el intrusivo alterado de 60 Mpa y frence chert de 29 Mpa.
- Los esfuerzos inducidos provocados por el método de minado ocasionan daño a labores aledañas, generando mecanismo de falla por deformación, dicho mecanismo conlleva a tener problemas en el sostenimiento debido a la deformación temprana y obliga a determinar un sostenimiento más robusto para garantizar su estabilidad de acuerdo con el tiempo de duración de la labor.
- Según el monitoreo de cable TDR el crecimiento del cono de subsidencia se está desarrollando con velocidad, actualmente se tiene un Crown Pillar de 338m, de continuar con el ascenso esta zona estaría catalogada como medio a crítico vista desde la zona superficial.
- Se concluye que el presente estudio ha alcanzado los objetivos propuestos, se interpretó el monitoreo de cable TDR y de la misma forma se logra analizar el efecto de los esfuerzos post minado por Sub Level Caving.

## RECOMENDACIONES

- Para una mejor interpretación del monitoreo y control del cono de subsidencia es recomendable la instalación de más cables TDR en puntos estratégicos, esto permitirá una supervisión continua y detección temprana de cambios en la estabilidad del terreno.
- Continuar con las simulaciones de estabilidad con diferentes softwares y comportamiento a mayores profundidades del caving ya que el minado continuará por debajo del nivel 1120, para determinar la influencia que abarca con respecto a la infraestructura que se tiene en la superficie, de esta manera determinar un mínimo de Crown Pillar para evacuar toda la zona superficial de ser necesario.
- Automatizar e instalar más equipos de monitoreo para el control de la subsidencia tanto de manera superficial como subterráneo.
- Establecer una frecuencia de monitoreo remoto, configurar la toma de datos por el Gateway cada 3 horas para alargar el tiempo de vida de este. Además de mantener una frecuencia de monitoreo en campo semanal para precisar de que la data remota coincida exactamente con el data logger.
- Automatizar más el sistema de monitoreo y que este sea posible emitir una alarma en caso se identifique un cambio anómalo en los cables TDR.
- Proporcionar capacitación adecuada al personal encargado del monitoreo para que puedan interpretar correctamente los datos obtenidos y tomar decisiones informadas en función de los resultados.
- Realizar un análisis de tendencias a largo plazo de los datos de monitoreo para identificar patrones y cambios significativos en el comportamiento del macizo rocoso lo cual ayudará a predecir posibles eventos futuros y tomar decisiones preventivas.

- Al concluir con la extracción de todas las reservas del cuerpo esperanza, se recomienda realizar un plan de cierre que asegure que el área superficial no se vea afectada por el hundimiento realizado.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acuña Solis, P. (2018). *Mejoramiento del método de extracción Sublevel Caving en el Cuerpo Mineralizado Angelita, Cia Minera Sierra Metals Yauyos - Lima*. Cusco: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.
- AEA Technology, Inc. (2022). *Operating Manual E20/20 TDR & Avionics TDR*. AEA Technology, Inc.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering Rock Mass Clasifications*. Philadelphia: John Wiley & Sons, Inc.
- Brown, E. T. (2007). *Block Caving geomechanics. Second Edition*.
- Cabello Chacon, J. M. (2018). *Optimización del método de minado sub level caving en la Unidad De Acumulación Yauricocha de Sociedad Minera Corona S.A.* 2018: Universidad Nacional del Centro del Perú.
- Cárcama Bernt, C. A. (2016). *Impacto de la geometría de la cavidad en el hundimiento de la columna*. Santiago: Facultad De Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería de Minas, Universidad de Chile.
- DCR Ingenieros S.R.Ltda. (2019). *Actualización del estudio de subsidencia en mina Yauricocha*. Lima: DCR Ingenieros S.R.Ltda.
- Duplancic, P., & Brady, B. H. (1999). Characterisation of caving mechanisms by analysis of seismicity and rock stress. *Proceedings 9th International Congress on Rock Mechanics, Paris, (Editors: G Vouille and P Berest)*. Balkema: Rotterdam,, 1049-1053.
- Flores, G. (2005). *Rock mass response to the transition from open pit to underground cave mining*. The University of Queensland, Australia.: Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy. Julius Kruttschnitt Mineral Research Center. School of Engineering.

- GMT. (2015). Impacto del fracturamiento hidráulico en la hundibilidad de la columna. *División El Teniente, Codelco-Chile.*
- Hoek, E., & Brown, E. (1988). The Hoek-Brown failure criterion—a 1988 update. *Proceedings of the 15th Canadian Rock Mechechanics Symposium, University of Toronto, Toronto, 32-34.*
- Hoek, E., & Diederichs, M. (2006). Empirical estimation of rock mass modulus. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Volume 43, Issue 2, 203-215.*
- Hustrulid, W., & Rudolf, K. (2008). *Sublevel caving - past and future.* Luleå: 5th International Conference and Exhibition on Mass Mining.
- Ingeoexpert. (s.f). *Curso de modelización numérica con RS2.* Obtenido de Curso de modelización numérica con RS2: <https://ingeoexpert.com/cursos/curso-de-modelizacion-numerica-con-rs2/>
- Jakubec, J., Lagace, D., Boggis, B., Clark, L., & Lewis, P. (2018). Underground mining at Ekati and Diavik diamond mines. *Proceedings of the Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving, 73-88.*
- Kvapil, R. (1992). *Sub Level Caving.* SME Mining Engineers Handbook, 2nd Edition.
- Laubscher, D. (1994). Cave mining-the state of the art. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy.*
- O'Connor, K. M., & Wade, L. W. (1994). *Applications of time domain reflectometry in the mining industry.* In K.M. O`Connor, C.H. Dowding & C.C. Jones (Eds.). Minneapolis, USA: U.S. Bureau of Mines, Department of Interior.: Symposium on Time Domain.

- Panek, L. A., & Tesch, W. J. (1981). *Monitoring Ground Movements Near Caving Stopes: Methods and Measurements*. Michigan: U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines.
- Priest, S. D., & Hudson, J. A. (1976). Discontinuity spacings in rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Volume 13, Issue 5,*, 135-148.
- Puentes Uribe, I. A. (2021). *Modelamiento de esfuerzos verticales a través de autómatas celulares en minería de Block/Panel Caving*. Concepción: Universidad de Concepción.
- Rendon Zurco, G. R. (2020). *Evaluación técnica - económica del método de explotación sublevel caving para su mecanización, tajo Esperanza nivel 1020 – Unidad Minera Yauricocha de Sierra Metals INC*. Huancayo: Universidad Continental.
- Rocscience. (2023). *2D and 3D Geotechnical Software*. Obtenido de <https://www.rocscience.com/>
- RST Instruments. (20 de Agosto de 2019). *Reflectometría en el dominio del tiempo (TDR)*. Obtenido de [https://rstinstruments.com/wp-content/uploads/Reflectometria-en-el-dominio-del-tiempo-TDR-MIB0604A\\_SPAN.pdf](https://rstinstruments.com/wp-content/uploads/Reflectometria-en-el-dominio-del-tiempo-TDR-MIB0604A_SPAN.pdf)
- Sheorey, P. (1994). A theory for In Situ stresses in isotropic and transverseley isotropic rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Volume 31, Issue 1,* 23-34.
- Solutions, T. (s.f). *Monitoreo geotécnico de minas e infraestructura*. Obtenido de Monitoreo geotécnico de minas e infraestructura: <https://timeus-solutions.com/servicios/>

- Soto Hinojosa, A. J. (2018). *Estudio geomecánico y dimensionamiento de minado del cuerpo esperanza de Mina Yauricocha*. Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú.
- Szwedzicki, T., Widijanto, E., & Sinaga, F. (2004). *Propagation of a caving zone, a case study from PT Freeport, Indonesia*. In A. Karzulovic & M.A. Alafaro (Eds.). Santiago, Chile: Instituto de Ingenieros de Chile.: 4th International Conference and Exhibition on Mass Mining (pp. 508-512).
- Wimmer, M., & Ouchterlony, F. (2008). *Application of time domain reflectometry (TDR) for block and sublevel caving mines*. Luleå: Swedish Blasting Reserch Center.
- Zanabria Huanasca, M. (2021). *Evaluación de la subsidencia inducida por la extracción de mineral para determinar la estabilidad del pique Mascota y Central en la U.M Yauricocha*. Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú.

## **ANEXOS**

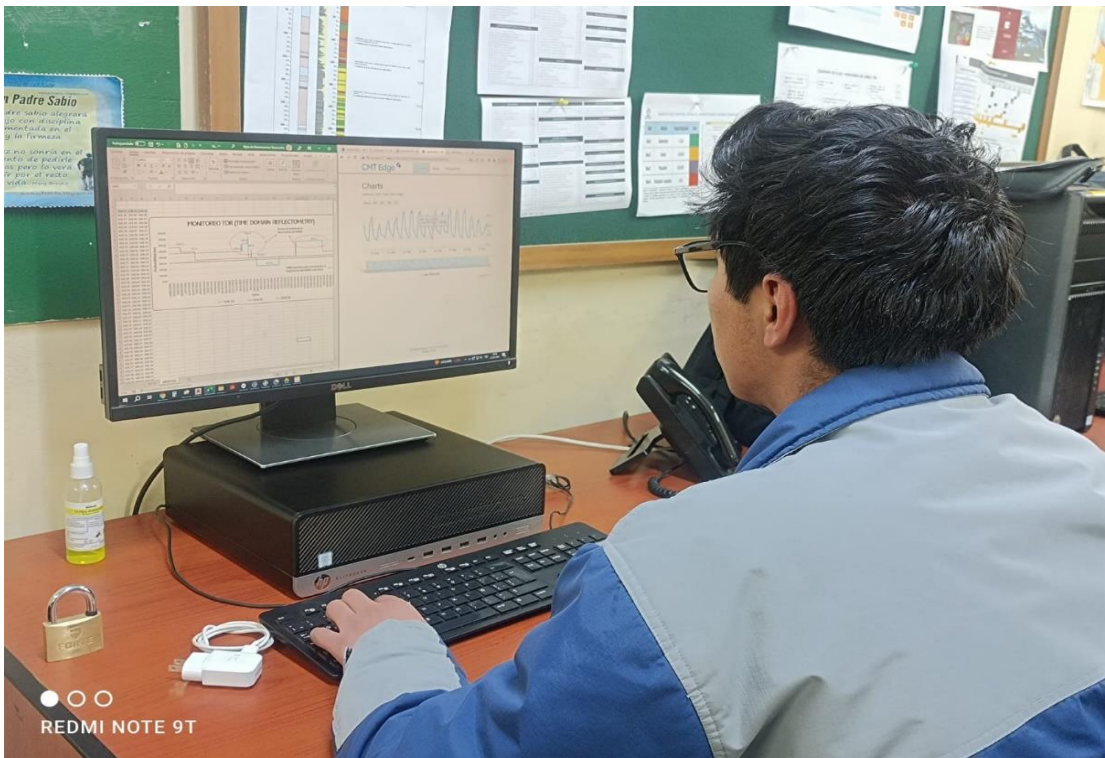
## ANEXO A: INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

### Datos del monitoreo de cable TDR (Mayo de 2022)

FECHA	TDR_01	TDR_02	TDR_03
17/05/2022	460	560	309
18/05/2022	460	560	309
18/05/2022	460	560	309
19/05/2022	460	560	309
19/05/2022	460	560	309
20/05/2022	460	560	309
20/05/2022	460	560	309
21/05/2022	460	560	309
21/05/2022	460	560	309
22/05/2022	460	560	309
22/05/2022	460	560	309
23/05/2022	460	560	309
23/05/2022	460	560	309
24/05/2022	460	560	309
24/05/2022	460	560	309
25/05/2022	460	560	309
25/05/2022	460	560	309
26/05/2022	460	560	309
26/05/2022	460	560	309
27/05/2022	460	560	309
27/05/2022	460	560	309
28/05/2022	460	560	309
28/05/2022	460	560	309
29/05/2022	460	560	309
29/05/2022	460	560	309
30/05/2022	460	560	309
30/05/2022	460	560	309
31/05/2022	460	560	309
31/05/2022	460	560	309
1/06/2022	460	560	309
1/06/2022	460	560	309
2/06/2022	460	560	309
2/06/2022	460	560	309
3/06/2022	460	560	309
3/06/2022	460	560	309
4/06/2022	460	560	309
5/06/2022	460	560	309
5/06/2022	460	560	309
6/06/2022	460	560	309
6/06/2022	460	560	309
7/06/2022	460	560	309
7/06/2022	460	560	309
8/06/2022	460	560	309
8/06/2022	460	560	309
9/06/2022	460	560	309
9/06/2022	460	560	309
10/06/2022	460	560	309
10/06/2022	460	560	309
11/06/2022	460	560	309

11/06/2022	460	560	309
12/06/2022	460	560	309
12/06/2022	460	560	309
13/06/2022	460	560	309
13/06/2022	460	560	309
14/06/2022	460	560	309
14/06/2022	460	560	309
15/06/2022	460	560	309
15/06/2022	460	560	309
16/06/2022	460	560	309
16/06/2022	460	560	309
17/06/2022	460	560	309
17/06/2022	460	560	309
18/06/2022	460	560	309
18/06/2022	460	560	309
19/06/2022	460	560	309
19/06/2022	460	560	309
20/06/2022	460	481	309
20/06/2022	460	481	309
21/06/2022	460	481	309
21/06/2022	460	481	309
22/06/2022	460	481	309
22/06/2022	460	481	309
23/06/2022	460	480	309
23/06/2022	460	481	309
24/06/2022	460	481	309
24/06/2022	460	481	309
25/06/2022	460	480	309
25/06/2022	460	481	309
26/06/2022	460	480	309
26/06/2022	460	481	309
27/06/2022	460	480	309
27/06/2022	460	481	309
28/06/2022	460	480	309
28/06/2022	460	481	309
29/06/2022	460	481	309
29/06/2022	460	481	309
30/06/2022	460	480	309
30/06/2022	460	481	309

## Análisis de monitoreo de cable TDR



## Formato de revisión diaria del sistema de monitoreo cable TDR

### REVISIÓN DIARIA DEL MONITOREO DE CABLE TDR (DATA REMOTA) FEBRERO 2023

Fecha	Revisión 5:30 a.m	Revisión 5:30 p.m	¿Presenta anomalías?	Revisado por:	Firma
1/02/2023					
2/02/2023					
3/02/2023					
4/02/2023					
5/02/2023					
6/02/2023					
7/02/2023					
8/02/2023					
9/02/2023					
10/02/2023					
11/02/2023					
12/02/2023					



13/02/2023					
14/02/2023					
15/02/2023					
16/02/2023					
17/02/2023					
18/02/2023					
19/02/2023					
20/02/2023					
21/02/2023					
22/02/2023					
23/02/2023					
24/02/2023					
25/02/2023					
26/02/2023					
27/02/2023					
28/02/2023					

### Rangos de criticidad monitoreo de cable TDR

RESPUESTA	CRITERIO	CONDICIÓN	ACCIÓN
	Longitud del cable		
<b>Nivel 1</b>	Los cables TDR no presentan ningún cambio y mantienen su longitud inicial.	Normal	Continuar con el monitoreo normal con una frecuencia diaria.
<b>Nivel 2</b>	Los cables TDR presentan una lectura incoherente (longitud de cable mayor al monitoreo anterior) y validado con el monitoreo en campo.	Preventivo	Alertar y/o comunicar a la Gerencia de Operaciones
			Hacer reportes para que el área de operaciones mina del cuerpo esperanza tenga conocimiento que la rotura puede ocurrir en cualquier momento. Difundir al personal de interior mina a la supervisión y colaboradores.
			Realizar el análisis e interpretación de los datos mediante gráficos y modelamientos. Monitorear de manera permanente.
<b>Nivel 3</b>	Los cables TDR presentan corte o cizallamiento mayor a 15 metros y este es evidenciado tanto en el monitoreo del Getaway y validado con Datalogger en campo	Crítico	Comunicación a la Gerencia de operaciones y alta gerencia para activar el plan de contingencia.
			Evacuar al personal que se encuentra en las labores de explotación de interior mina por un periodo de 4 horas hasta validar con una inspección en las labores superiores y adyacentes del minado SLC.
			Verificar posibles indicios de soplo mediante los controles de gestión de riesgo para SLC.

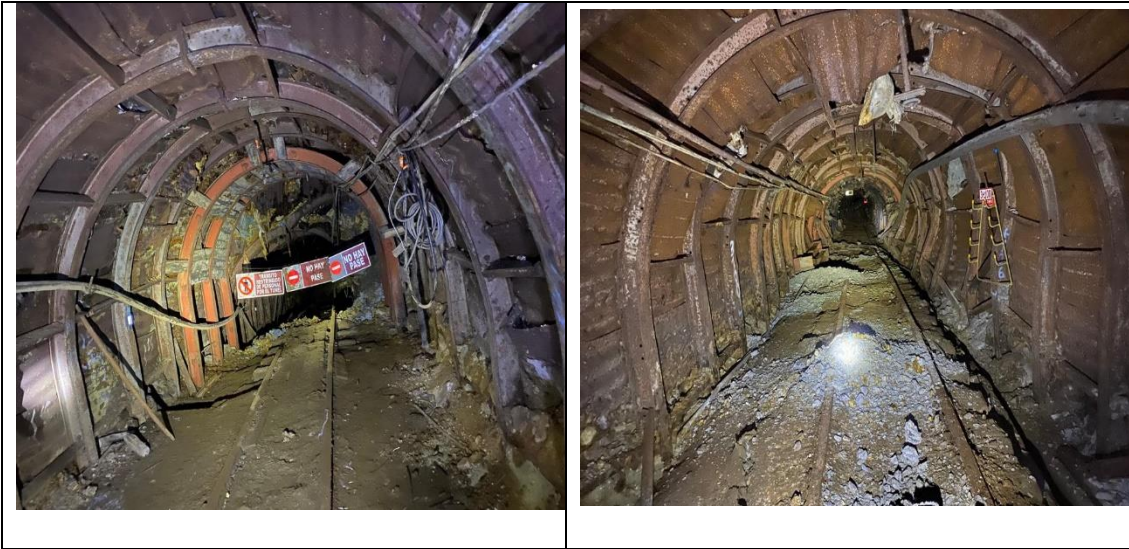


## **ANEXO B: EVIDENCIA FOTOGRÁFICAS TRABAJOS DE CAMPO**

### **Fotografía panorámica de la unidad minera**



**Deformación de cimbras por efecto del minado de Sublevel Caving**



**Estación de monitoreo de convergencia Pique Central Nv.970**





**Hito prismático para el monitoreo de desplazamiento en la zona de subsidencia**



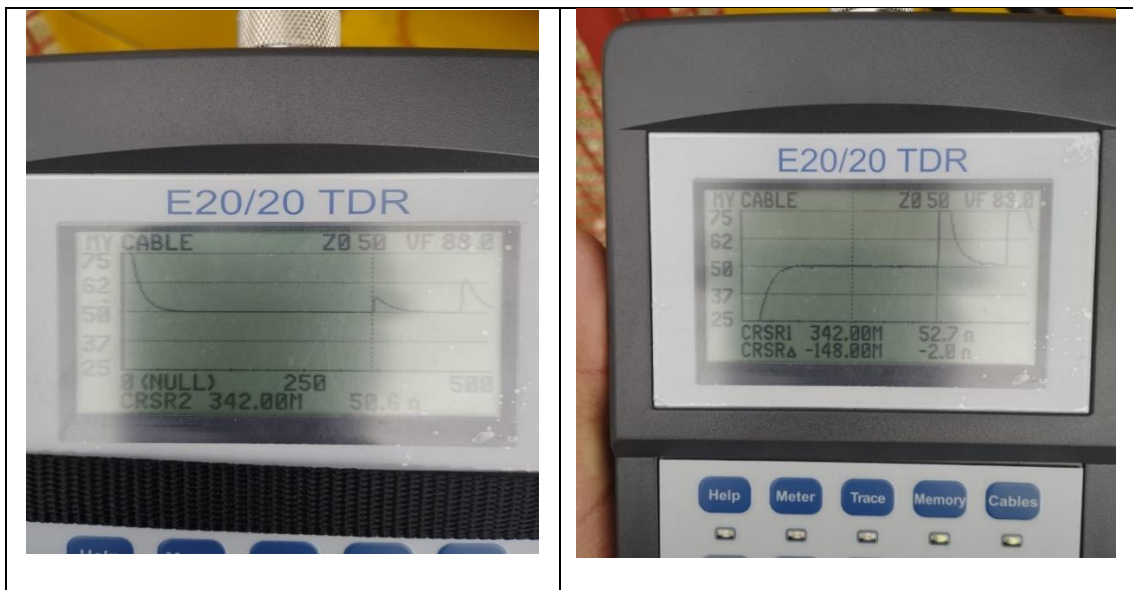
**Equipo de monitoreo data logger**



## Punto de monitoreo del cable TDR 01



## Monitoreo en campo del cable TDR 01



## Gateway TDR 01

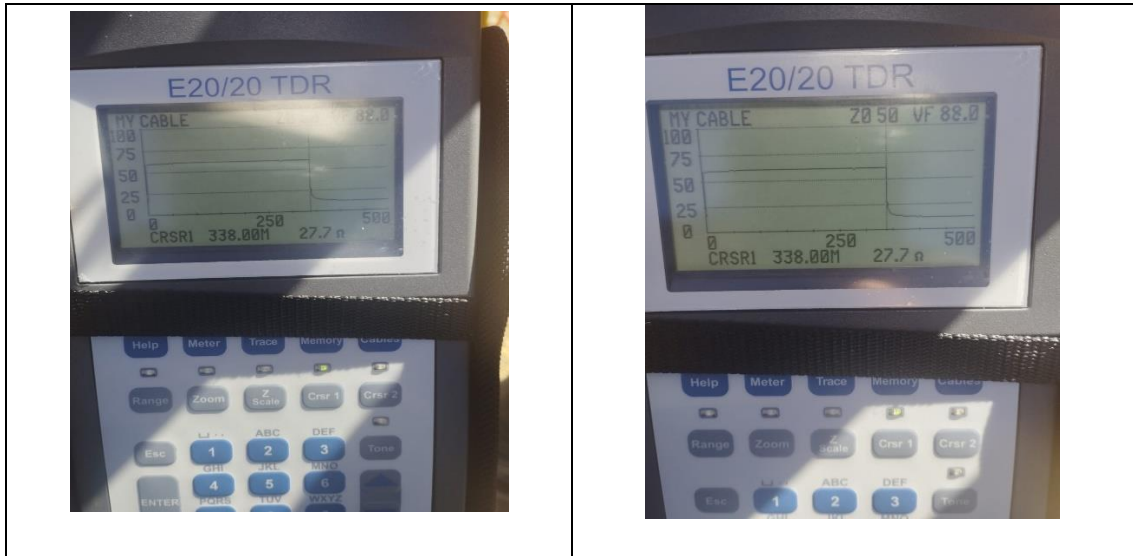


## Punto de monitoreo del cable TDR 02





## Monitoreo en campo del cable TDR 02



## Efectos superficiales por influencia del método de minado Sublevel Caving



## Gateway TDR 02



## ANEXO C: MATRIZ DE CONSISTENCIA

**Título: “Interpretación del monitoreo de Cable TDR para el control del cono de subsidencia del Cuerpo Esperanza en la U.M**

**Yauricocha”**

<b>PROBLEMA</b>	<b>OBJETIVO</b>	<b>HIPÓTESIS</b>	<b>VARIABLES</b>	<b>METODOLOGÍA</b>
<b>Problema general</b>	<b>Objetivo general</b>	<b>Hipótesis general</b>	<b>V. Independiente</b> X = Interpretación del monitoreo de Cable TDR  <b>V. Dependiente</b> Y = Control del cono de subsidencia	<b>Tipo de investigación</b> Tipo cuantitativo, aplicativo y explicativo  <b>Método de investigación</b> Influencia y Relación  <b>Diseño de investigación</b> Correlacional  <b>Población</b> Área superficial y subterránea afectada por el cono de subsidencia de la Unidad Minera Yauricocha.  <b>Muestra</b> Zona de influencia en proyección a las labores subterráneas activas del Cuerpo Esperanza.
¿Cómo influye la interpretación del monitoreo de Cable TDR en el control del cono de subsidencia del Cuerpo Esperanza en la UM Yauricocha?	Interpretar el monitoreo de cable TDR para el control del cono de subsidencia del Cuerpo Esperanza de la U.M Yauricocha.	La interpretación del monitoreo de cable TDR influye directamente en el control del cono de subsidencia del Cuerpo Esperanza en la U.M Yauricocha.		
<b>Problemas específicos</b>	<b>Objetivos específicos</b>	<b>Hipótesis específicas</b>		
1.- ¿De qué manera la interpretación del monitoreo de cable TDR se relaciona con los esfuerzos inducidos por el método de minado Sublevel Caving del Cuerpo Esperanza en la UM Yauricocha?	1.- Realizar la interpretación del monitoreo de cable TDR para relacionarlo con los esfuerzos inducidos por el método de minado Sublevel Caving del Cuerpo Esperanza en la UM Yauricocha.	1.- La interpretación del monitoreo de cable TDR tiene relación directa con los esfuerzos inducidos por el método de minado de Sublevel Caving del Cuerpo Esperanza en la UM Yauricocha.		
2.- ¿Cómo la interpretación del monitoreo de cable TDR influye en los aspectos de seguridad en la gestión de riesgos geotécnicos del Cuerpo Esperanza en la UM Yauricocha?	2.- Interpretar los datos del monitoreo de cable TDR para la toma de decisiones en aspectos de seguridad en la gestión de riesgos geotécnicos del Cuerpo Esperanza en la UM Yauricocha.	2.- Con la interpretación del monitoreo de cable TDR, se toma decisiones efectivas en aspectos de seguridad en la gestión de riesgos geotécnicos del Cuerpo Esperanza en la UM Yauricocha		

## Variables e indicadores

TIPO DE VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	
Variable Independiente  X = Interpretación del monitoreo de cable TDR.	Se interpreta el monitoreo de cable TDR para prever y controlar el ascenso de la bóveda del cono de subsidencia, advirtiendo de colapsos inesperados o no deseados. El cable TDR localiza defectos y/o cambios en cables metálicos. O'Connor & Wade, (1994).	La variable se evaluará las mediciones con el análisis de la variación de la longitud a lo largo del tiempo del cable TDR. Se dará con el uso del datalogger y software.	X1 = Características del cable TDR.	Diámetro.	pulgadas
				Vida útil del cable TDR.	años
				Sistema transmisión de data.	adimensional
			X2 = Sistema de monitoreo y variación de la longitud del Cable TDR insertado en el Cuerpo Esperanza de la U.M. Yauricocha.	Longitud del cable TDR.	metros
			X3 = Tiempo de monitoreo del Cable TDR insertado en el Cuerpo Esperanza de la U.M. Yauricocha.	Tiempo de monitoreo hasta la variación de la longitud del cable TDR.	horas
Variable dependiente  Y = Control del cono de subsidencia	El cono de subsidencia es una depresión en la superficie del terreno que se forma como resultado de la extracción de la mineralización. Szwedzicki, Widijanto, & Sinaga, (2004).	La variable incluye un sistema de alerta en caso el cable TDR presente anomalías, así mismo se realizará un análisis de esfuerzos y estabilidad del cono de subsidencia mediante caracterización de la masa rocosa y modelamiento.	Y1 = Ascenso de la bóveda del cono de subsidencia	Estudio geomecánico y modelamiento numérico para estimar esfuerzos inducidos.	MPa
				deformaciones en las excavaciones.	milímetros
			Y2 = Aspectos de seguridad en la gestión de riesgos.	Alertas de seguridad.	Rangos de criticidad – niveles