

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS
ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



T E S I S

**Implementación del Sistema Geocentinela para el monitoreo del Sill Pillar del
Cuerpo Pamela en la Unidad Minera Yauricocha 2025**

Para optar el título profesional de.

Ingeniero de Minas

Autor:

Bach. Fernando CHAVEZ JAVIER

Asesor:

Dr. Agustín Arturo AGUIRRE ADAUTO

Cerro de Pasco - Perú – 2026

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS
ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



T E S I S

Implementación del Sistema Geocentinela para el monitoreo del Sill Pillar del

Cuerpo Pamela en la Unidad Minera Yauricocha 2025

Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado.

Mg. Silvestre Fabian BENAVIDES CHAGUA
PRESIDENTE

Mg. Nelson MONTALVO CARHUARICRA
MIEMBRO

Ing. Julio César SANTIAGO RIVERA
MIEMBRO



UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN

Facultad de Ingeniería de Minas

Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de Minas

"Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia"



INFORME DE ORIGINALIDAD N° 019-2026

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. CHAVEZ JAVIER, Fernando

Escuela de Formación Profesional
Ingeniería de Minas

Tipo de trabajo:
Tesis

Título del trabajo:
**"Implementación del Sistema Geocentinela para el Monitoreo del Sill Pillar del
Cuerpo Pamela en la Unidad Minera Yauricocha 2025".**

Asesor:
Dr. Aguirre Adaauto, Agustín Arturo

Índice de Similitud: 5 %

Calificativo:

APROBADO

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

Cerro de Pasco, 05 de junio de 2026



Firmado digitalmente por
FERNANDEZ MALLQUI Raul FAU
20154605046 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 05.06.2026 15:45:48 -05:00

DEDICATORIA

A mi madre, Ana Javier Ramos quien con
su esfuerzo y sacrificio fue motivo para
concluir mi carrera.

A mi abuela, Gregoria Ramos con quien compartí
gran parte de mi vida a quién agradeceré
eternamente por sus sabios consejos.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, dar las gracias a Dios por darme sabiduría. A mis tios. Elva, Irma, Walter Lopez, José, Mara, Jaime y Nelly quienes me dieron su soporte en mi época Universitaria.

A mis compañeros, amigos y colegas de trabajo de Sociedad Minera Corona – Yauricocha con quienes afrontamos grandes retos técnicos en la estabilidad de macizo rocoso para el minado por Sub Level Caving en zonas de altos esfuerzos.

Asimismo, a los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, por compartir sus conocimientos.

Finalmente, a mi alma mater, a la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión donde compartí años muy gratos llenos experiencia y aprendizajes.

RESUMEN

El presente estudio de investigación tuvo como objetivo, evaluar la efectividad del Sistema Geocentinela como herramienta de monitoreo geomecánico integral para el control de estabilidad del sill pillar en el cuerpo Pamela Unidad Yauricocha.

Este sistema facilita el monitoreo del hundimiento localizado (colapso del sill pillar), lo que desencadena un aumento en la magnitud y expansión del cono de subsidencia. Como consecuencia, se incrementa la inestabilidad en las labores mineras circundantes, afectando su integridad estructural. Dichos fenómenos no solo elevan la altura del caving (proceso de hundimiento), sino que también promueven la propagación de tensiones geomecánicas, manifestadas mediante eventos microsísmicos en zonas aledañas. Estos disturbios comprometen significativamente el desarrollo normal de las operaciones de explotación, generando riesgos operacionales y retrasos en la producción. Además, la interacción entre el colapso del sill pillar y la subsidencia puede exacerbar las deformaciones en el macizo rocoso circundantes a la zona de minado. La detección temprana de estos patrones mediante el sistema de monitoreo resulta clave para optimizar la planificación minera y garantizar la seguridad para un desarrollo normal de nuestras operaciones.

La implementación del Sistema Geocentinela contribuyó a optimizar la toma de decisiones técnicas, permitiendo ajustes oportunos en la planificación minera prevención de riesgos de fallo del macizo rocoso durante el proceso de minado. Como conclusión, el Sistema Geocentinela demostró capacidad para anticipar condiciones críticas, mejorar la confiabilidad del análisis geomecánico y reducir la exposición al riesgo operativo.

Palabras clave. Sistema Geocentinela, monitoreo, sill pilar

ABSTRACT

This research study aimed to evaluate the effectiveness of the Geosentinel System as a comprehensive geomechanical monitoring tool for sill pillar stability control in the Pamela orebody at the Yauricocha Unit.

This system facilitates the monitoring of localized subsidence (sill pillar collapse), which triggers an increase in the magnitude and expansion of the subsidence cone. Consequently, instability increases in the surrounding mining operations, affecting their structural integrity. These phenomena not only increase the caving height (subsidence process) but also promote the propagation of geomechanical stresses, manifested through microseismic events in adjacent areas. These disturbances significantly compromise the normal development of mining operations, generating operational risks and production delays.

Furthermore, the interaction between sill pillar collapse and subsidence can exacerbate deformations in the rock mass, requiring corrective interventions to mitigate long-term impacts. Early detection of these patterns through the monitoring system is key to optimizing mine planning and ensuring the safety of our operations.

The implementation of the Geosentinel System helped optimize technical decision-making, allowing for timely adjustments to mine planning to prevent rockfall risks during the mining process. In conclusion, the Geosentinel System demonstrated its ability to anticipate critical conditions, improve the reliability of geomechanical analysis, and reduce exposure to operational risk.

Keywords. Geosentinel System, monitoring, sill pillar

INTRODUCCIÓN

La Mina Yauricocha, ubicada en la sierra central del Perú, constituye un ejemplo representativo de minería subterránea polimetálica desarrollada en un macizo rocoso estructuralmente complejo y sometido a esfuerzos elevados. Debido a la profundización progresiva de las labores y a la interacción entre cuerpos mineralizados, se ha incrementado la necesidad de implementar herramientas avanzadas de control geomecánico que permitan anticipar escenarios de inestabilidad asociados al sill pillar.

Tradicionalmente, el diseño y evaluación de pilares se ha basado en métodos empíricos y análisis numéricos estáticos. Sin embargo, la presencia e incremento del cono de subsidencia genera esfuerzos inducidos producto del minado, redistribución tensional acelerada y desarrollo de zonas plástica han evidenciado la necesidad de adoptar sistemas integrados de monitoreo en tiempo real. En respuesta a esta demanda técnica surge el Sistema Geocentinela, concebido como una plataforma de monitoreo geomecánico de instrumentación geotécnica en tiempo real.

El sistema de monitoreo por corte, conocido como Geocentinela, representa una solución tecnológica avanzada y esencial para la gestión de riesgos geotécnicos en la minería subterránea. Permite supervisar en tiempo real la estabilidad estructural del sill pillar, vigilando continuamente posibles colapsos, deformaciones progresivas y la expansión del área de subsidencia hacia sectores críticos. Esta capacidad de alerta temprana resulta clave para anticipar y mitigar peligros inminentes, contribuyendo directamente a la seguridad del personal, la protección de equipos e infraestructura de alto valor ante eventuales colapsos, y la estabilidad general del área de explotación. En conjunto, estas funciones posicionan al Geocentinela como una herramienta imprescindible para una operación minera segura y sostenible.

En el Capítulo I, se consideró el problema de investigación; que, está compuesto con la identificación y formulación del problema, sus objetivos y también su justificación.

En el Capítulo II, presentamos el marco teórico, mencionando los antecedentes a la investigación, detallamos las generalidades de la unidad minera. Describimos las bases teóricas y finalmente definimos los términos que se emplean en la presente investigación; también, la formulación de hipótesis e identificación de las variables independiente y dependiente y la matriz de consistencia.

En el Capítulo III, se considera la metodología, el tipo de investigación, la población y el muestreo, técnicas de recolección y procesamiento de los análisis de los datos.

En el Capítulo IV, se desarrolló el análisis y la interpretación del resultado de la implementación del sistema Geocentinela para el monitoreo del sill pillar del Cuerpo Pamela en la Unidad Minera Yauricocha 2025.

ÍNDICE

Página.

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

ÍNDICE

INDICE DE TABLAS

INDICE DE FIGURAS

CAPITULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1.	Identificación y determinación del problema.....	1
1.2.	Delimitación de la investigación.....	2
1.3.	Formulación del problema	35
1.3.1.	Problema general.....	35
1.3.2.	Problemas específicos	35
1.4.	Formulación de objetivos.....	35
1.4.1.	Objetivos generales	35
1.4.2.	Objetivos específicos.....	35
1.5.	Justificación de la investigación	36
1.6.	Limitaciones de la investigación.....	36

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1.	Antecedentes de estudio.....	38
------	------------------------------	----

2.2.	Bases teóricas – científicas.....	39
2.3.	Definición de términos básicos	56
2.4.	Formulación de Hipótesis	58
2.4.1.	Hipótesis General	58
2.4.2.	Hipótesis Específicas.....	58
2.5.	Identificación de variables	58
2.6.	Definición Operacional de variable e indicadores	59

CAPITULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE LA INVESTIGACIÓN

3.1.	Tipo de investigación	60
3.2.	Nivel de investigación.....	60
3.3.	Método de investigación	61
3.4.	Diseño de investigación	61
3.5.	Población y muestra	61
3.6.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	62
3.7.	Técnicas de procesamiento y análisis de datos	63
3.8.	Tratamiento estadístico	63
3.9.	Orientación ética	63

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.	Descripción del trabajo de campo	64
4.2.	Presentación, análisis e interpretación de resultados	82
4.3.	Prueba de hipótesis.....	103
4.4.	Discusión de resultados.....	105

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIA BIBLIOGRAFICA

ANEXOS

INDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Unidades estratigráficas	7
Tabla 2. Orientación de las discontinuidades intermedias	15
Tabla 3. Orientación de las discontinuidades menores	16
Tabla 4. Estimación de reservas en la Unidad de Acumulación Yauricocha.....	18
Tabla 5. Unidades geotécnicas e índices de calidad geotécnica.....	52
Tabla 6. Unidades geotécnicas y propiedades de roca intacta.	52
Tabla 7. Unidades geotécnicas y propiedades de roca intacta.	53
Tabla 8. Tensor de esfuerzos de mina yauricocha	54
Tabla 9. Variable e indicadores de operación.....	59
Tabla 10. Proyecto de taladros para la instalación del Geocentinel	67
Tabla 11. Código de colores para la clasificación del macizo rocoso	81

INDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Ubicación de mina Yauricocha.	2
Figura 2. Ruta Panamerica. Lima – Cañete – Mina Yauricocha.	3
Figura 3. Ruta Carretera Central. Lima – Oroya - Jauja - Mina Yauricocha.	4
Figura 4. Ruta desde la ciudad de Huancayo. Huancayo - Mina Yauricocha.....	4
Figura 5. Plano geológico regional, del cuadrángulo de Yauyos, modificado de Ingemmet (1996).....	6
Figura 6. Freddy Melo, mina Yauricocha, 2018.	6
Figura 7. Vista de la planta geológica del Nivel 1.270, Piso 00 (cota 3.640 m.s.n.m.), y sección NE-SW representativa.....	8
Figura 8. Planta del Nivel 1.070, Piso 00 (cota 3.840 m.s.n.m.), con distribución de la mineralización.	10
Figura 9. Planta del Nivel 1.270, Piso 00 (cota 3.640 m s.n.m.), con discontinuidades mayores de mina Yauricocha.	11
Figura 10. E Modelo de Riedel (1929) aplicado en falla Yauricocha.	13
Figura 11. Planta del Nivel 820, Piso 00 (cota 4.090 m s.n.m.), con dominios estructurales.	14
Figura 12. Proyección estereográfica de dominios estructurales, para las discontinuidades intermedias.	14
Figura 13. Proyección estereográfica de dominios estructurales, para las discontinuidades menores.	16
Figura 14. Estimación de reservas en la Unidad de Acumulación Yauricocha.....	18
Figura 15. Vista isométrica de distribución de sondajes diamantinos con información geomecánica.	20
Figura 16.. Esquema general del método de explotación slc.....	21

Figura 17. Esquema de secuencia de explotación con bolsillos.	22
Figura 18. Representación gráfica del método de minado SLS, parte superior de la fotografía, subnivel superior; parte inferior de la fotografía (sub nivel inferior)	23
Figura 19. Esquema general del método Cut and Fill.....	24
Figura 20. Ciclo de minado Sub Level Caving, 2 horas, RMR. 21-30 (Tipo IV-B).....	25
Figura 21. Ciclo de minado corte y relleno ascendente mecanizado con jumbo, 7 días, RMR. 41-50 (Tipo III-B)	26
Figura 22. Ciclo de minado Sub Level Stopping mecanizado con Jumbo y Raptor/Muki, RMR 31-50 (Tipo IIIB/IVA).....	27
Figura 23. Sección esquemática del modelo de subsidencia	29
Figura 24. Potenciales mecanismos de inestabilidad a escala de galería en caliza e intrusivo	31
Figura 25. Potenciales mecanismos de inestabilidad a escala de galería en caliza alterada, intrusivo alterado y mineral	32
Figura 26. Potenciales mecanismos de inestabilidad a escala de galería en skarn	33
Figura 27. Zonas con sensibles a concentración y relajación de esfuerzos	34
Figura 28. Diagrama del cableado interno a colocarse dentro de los taladros diamantinos del sistema geocentinela.....	39
Figura 29. Diagrama del sistema de instrumentación por corte o Geocentinela.	40
Figura 30. Envolventes de dibujo de dibujo y movimiento (Just 1981).....	42
Figura 31. Modelo típico de arena que muestra la elipse de tracción.....	43
Figura 32. La teoría del elipsoide	45
Figura 33. Valores de excentricidad.....	45
Figura 34. RMR versus Altura de Interacción	47
Figura 35. Dibujo en base a al block caving.....	49

Figura 36. Planta del nivel 1.270, piso 00, y sección con unidades geotécnicas.....	51
Figura 37. Estereograma del tensor de esfuerzo de mina Yauricocha	54
Figura 38. Vista transversal de la ubicación del proyecto.	66
Figura 39. Vista de la ubicación del cuerpo Pamela	68
Figura 40. Proyecto plan de monitoreo por corte (geocentinela) hacia la parte baja de las labores de minado.	68
Figura 41. Cambio notorio en la coloración entre una roca fresca y con evidencia de relleno producto del caving.	69
Figura 42. Proyecto de sondajes D_PAM_12_25_01, D_PAM_12_25_02 y D_PAM_12_25_03.....	69
Figura 43. Proyecto de sondajes corte transversal D_PAM_12_25_01.....	70
Figura 44. Proyecto de sondajes corte transversal D_PAM_12_25_02, la parte final se ubica a 22m por debajo del proyecto de laboreo Nv820_P5.....	70
Figura 45. Proyecto de sondajes corte transversal D_PAM_12_25_03, parte final se ubica a 22m por debajo del proyecto de laboreo Nv820_P5.....	70
Figura 46. Proyecto de taladros de sondaje	71
Figura 47. Corte transversal del taladro, sección B-B'	71
Figura 48. Corte transversal del taladro, sección C-C'	72
Figura 49. Vista en planta de la zona de identificación de vacíos, M1	72
Figura 50. Vista en transversal de la zona de identificación de vacíos, M1	73
Figura 51. Vista isométrica de la zona de identificación de vacíos, M1.....	73
Figura 52. Proceso de instalación del cable Geocentinela.....	74
Figura 53. Diagrama resumido del sistema del sistema Geocentinela	75
Figura 54. Diagrama de instalación del sistema del sistema Geocentinela	75
Figura 55. Diagrama resumido del sistema de cableado interno en un taladro	76

Figura 56. Vista en planta del proyecto Geocentinela y el proyecto de excavación de las ventanas de explotación	76
Figura 57. Vista en planta de excavación de las ventanas de explotación y su influencia del M1	77
Figura 58. Corte transversal de la ventana de explotación V_-1 y su influencia del M1, (Corte A-A')	77
Figura 59. Corte transversal de la ventana de explotación V_0 y su influencia del M1, (Corte B-B')	78
Figura 60. Corte transversal de la ventana de explotación V_1 y su influencia del M1, (Corte C-C')	78
Figura 61. Vista isométrica del cuerpo Fortuna y M1(generado por el cuerpo Esperanza) ...	79
Figura 62. Orientación de discontinuidades presentes Nv 820-P5	80
Figura 63. Plano geomecánico Nv 820 – P5 –cuerpo Pamela	81
Figura 64. Altura de la zona de afectación 120m – 200m	84
Figura 65. Espesor y ancho del cuerpo pamela 50m x 120m para el piso Nv 820-P5	85
Figura 66. Ventanas de explotación respecto al M1 y taladros donde se ubican el Geocentinela..	86
Figura 67. Diagrama del sistema de instrumentación con representación LED, del sistema geocentinela.....	88
Figura 68. Vista general en planta del proyecto de instalación del sistema geocentinela.	89
Figura 69. Vista isométrica en planta del proyecto de instalación del sistema geocentinela.	89
Figura 70. Sistema de monitoreo y proceso de evacuación.....	91
Figura 71. Centro de monitoreo del sistema geocentinela de vigilancia constante	92
Figura 72. Monitoreo del sistema geocentinela, centro de control oficina de geomecánica ..	92
Figura 73. Canales de visualización de los cables geocentinela.....	93

Figura 74. Rotura del cable geocentinel.....	94
Figura 75. Orientación de sondajes de auscultación.....	95
Figura 76. Vista isométrica de la ubicación de la rotura cable (a los 85m)	96
Figura 77. Vista en planta de la ubicación de la rotura cable (a los 85m)	96
Figura 78. Orientación de sondajes de auscultación.....	97
Figura 79. Ubicación de la rotura cable (a los 65, 75, 85, 95, 107m).....	98
Figura 80. Vista en planta de la ubicación de la rotura cable (65, 75, 85, 95, 107m).....	98
Figura 81. Proyección de la subsidencia del cuerpo Esperanza hacia la zona de minado del cuerpo Pamela.	99
Figura 82. Sondajes de ubicación Fortuna Nv 820-P0 – Ventana 00.....	100
Figura 83. Propuesta de sondajes de auscultación hacia la zona de vacío, Fortuna Nv 820-P0 – Ventana 00	100
Figura 84. Proyecto de sondajes de auscultación hacia la zona de vacío del M1, Fortuna Nv 820-P0 – Ventana 00	101

CAPITULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Identificación y determinación del problema

La mina Yauricocha, opera principalmente mediante el método de explotación Sub Level Caving (SLC), debido a la geología de sus cuerpos mineralizados, depósitos de vetas angostas a cuerpos masivos de sulfuros polimetálicos. Si bien el SLC permite una alta tasa de producción y bajo costo de operación, también presenta desafíos críticos asociados a la subsidencia del terreno, generando riesgos de.

- Inestabilidad del macizo rocoso en zonas superficiales y subterráneas.
- Colapso de infraestructura minera (galerías, cámaras de extracción, chimeneas, servicios).
- Riesgos para la seguridad del personal.

Geocentinelas son básicamente sensores o instrumentos de monitoreo geotécnico que permiten determinar el desplazamiento o desprendimiento del macizo rocoso del sill pillar para el control de minado del cuerpo Pamela en la UM Yauricocha

Este dispositivo suele conectarse a plataformas de monitoreo remoto que permiten al área de geomecánica interpretar las condiciones del pilar en tiempo real y

tomar decisiones preventivas (como reforzar, evacuar o cambiar la secuencia de minado).

1.2. Delimitación de la investigación

1.2.1. Ubicación

La mina Acumulación Yauricocha se encuentra ubicada en los distritos de Alis y Laraos, en la provincia de Yauyos, perteneciente al departamento de Lima, Cordillera central de los Andes Peruanos a 423,074.00 metros Este y 8,638,979.00 metros Norte en la zona UTM 18L.

Figura 1. Ubicación de mina Yauricocha.



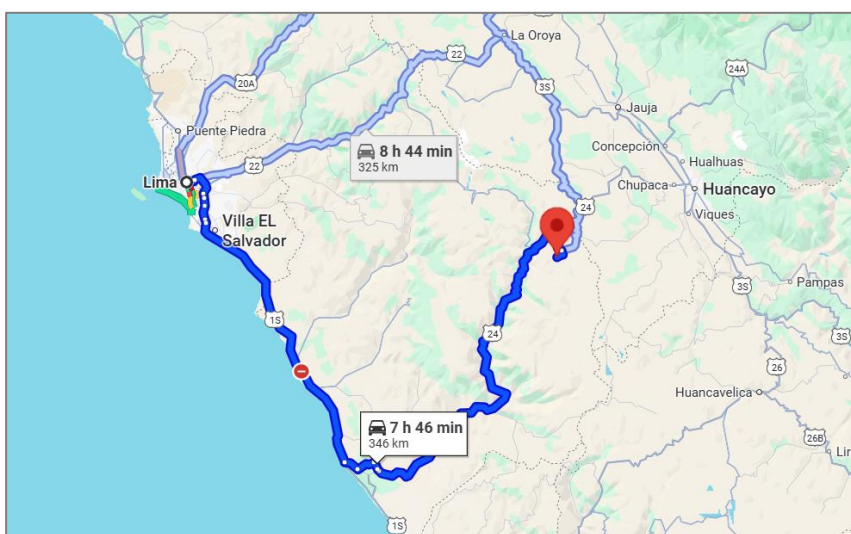
Fuente. Google Maps.

1.2.2. Accesibilidad

La Unidad Minera Yauricocha cuenta con dos vías de acceso terrestre distintas desde la ciudad de Lima, siendo la Carretera Central y la Carretera de la Panamericana Sur. Una vía de acceso desde la ciudad de Huancayo.

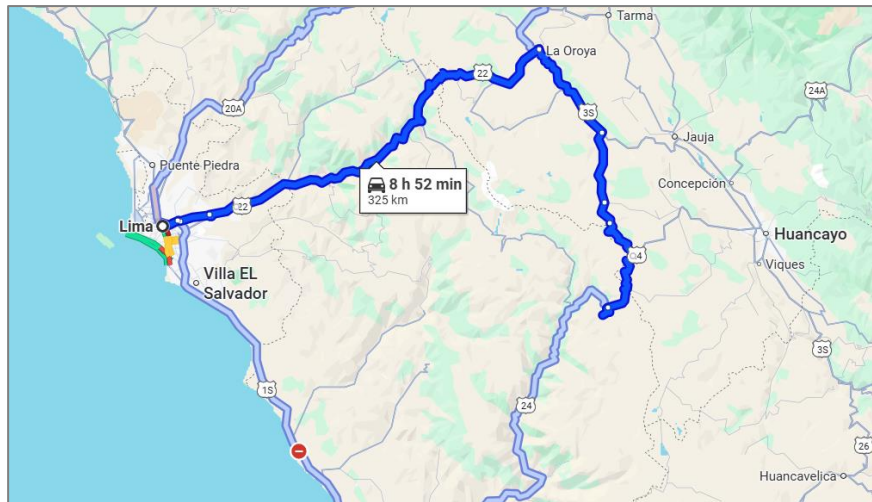
Vía	Ruta	Distancia	Tiempo
Panamerica Sur	Lima-Cañete-Mina Yauricocha	346 km.	7 h 45 min
Carretera Central	Lima-Oroya-Jauja - Mina Yauricocha	325 km.	8 h 44 min
Desde la ciudad de Huancayo	Huancayo - Mina Yauricocha	107 km.	2 h 42 min

Figura 2. Ruta Panamerica. Lima – Cañete – Mina Yauricocha.



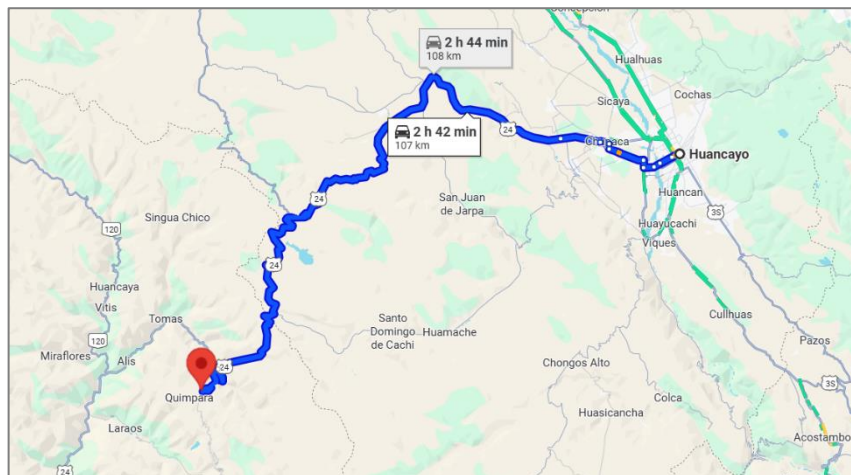
Fuente. Google Maps.

Figura 3. Ruta Carretera Central. Lima – Oroya - Jauja - Mina Yauricocha.



Fuente. Google Maps.

Figura 4. Ruta desde la ciudad de Huancayo. Huancayo - Mina Yauricocha



Fuente. Google Maps.

1.2.3. Geología regional

El yacimiento Yauricocha corresponde a un depósito polimetálico (Cu, Au, Ag, Pb, Zn), de edad Mioceno superior, emplazado en rocas sedimentarias del flanco este de la Cordillera Occidental del Perú, donde aflora una secuencia principalmente mesozoica, de rumbo NW-SE. En la base de esta secuencia se encuentra el Grupo Goyllarisquiza, de edad Cretácico Inferior, e incluye las litologías sedimentarias más antiguas, caracterizadas por areniscas, lutitas y calizas de ambiente fluvial-eólico. A continuación de este grupo, se depositaron en concordancia las calizas y lutitas de las

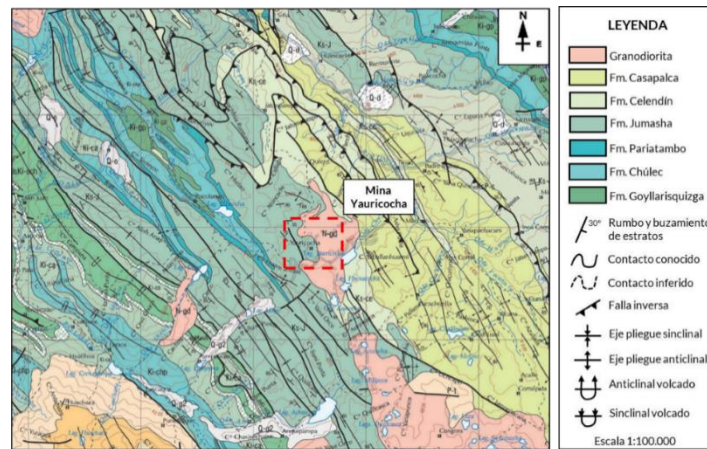
formaciones Chúlec y Pariatambo, de edad Cretácico medio. Sobre estas unidades se ubica la Formación Jumasha, del Cretácico Superior, correspondiente a un paquete de 700 m de espesor medio de calizas grises con intercalaciones de lutitas, y son la principal roca hospedante del yacimiento Yauricocha. Sobreyaciendo a la Formación Jumasha en concordancia, afloran en promedio 400 m de lutitas silicificadas con intercalaciones de calizas, correspondientes a la Formación Celendín (denominada localmente France Chert), y sobre esta los estratos rojizos de calizas y areniscas de la Formación Casapalca, ambas de edad cretácica superior.

Las rocas sedimentarias del sector de Mina Yauricocha presentan intrusiones de edad principal Mioceno superior, representado principalmente por un stock de composición granodiorita a monzonita cuarcífera, con algunas apófisis que alcanzan zonas más al W. Esta intrusión está asociada con reacciones de reemplazo en las calizas que permitieron el emplazamiento de los cuerpos mineralizados polimetálicos. Además, en el contacto del intrusivo con las rocas sedimentarias circundantes, se generaron aureolas de metamorfismo de contacto y skarn, resultando en franjas de reacciones de recristalización y reemplazo de los minerales.

El control estructural a escala regional está determinado por el Sistema de Fallas Chonta, caracterizado por fallas inversas de rumbo NW-SE con manteo al SW, que pueden tener también desplazamiento en el rumbo. Además, debido a los procesos tectónicos de compresión y alzamiento durante el Cenozoico, que conformaron la Cordillera Occidental, el paquete de rocas sedimentarias cretácicas sufrió un intenso plegamiento, resultando ejes orientados NW-SE, y buzamientos de 60 a

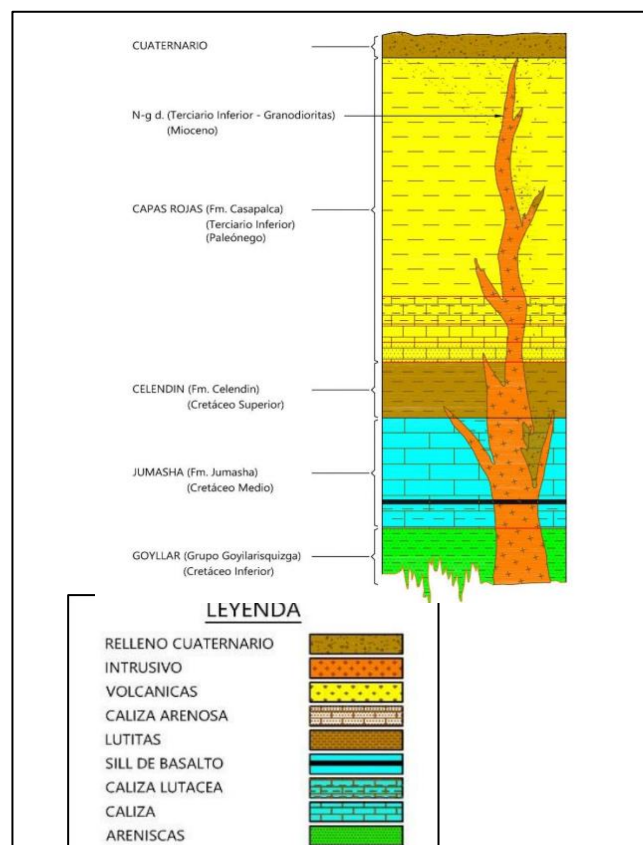
85° al NE y SW. En la Figura 05, se muestra un plano con la geología regional.

Figura 5. Plano geológico regional, del cuadrángulo de Yauyos, modificado de Ingemmet (1996)



Fuente. Elaboración propia.

Figura 6. Freddy Melo, mina Yauricocha, 2018.



Fuente. Freddy Melo, mina Yauricocha, 2018.

Tabla 1. Unidades estratigráficas

SIS-TEMA	SERIE	UNIDADES ESTRATIGRAFICAS	DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA	ESPESOR EN METROS
CUATERNARIO	PLEISTOCENO	Depósitos Glaciares	Material Morénico	No determinado
TERCIARIO	MIOCENO SUPERIOR	Intrusiones	De composición granodiorítica	No determinado
	EOCENO	Formación Casapalca (Capas Rojas)	Caliza interbandeada, caliza silicificada y fragmentos calcáreos	90 metros
	PALEOCENO		Caliza ligeramente silícea (Caliza Quishuar). Fragmentos calcáreos interband. con caliza silicificada.	70 metros 130 metros
CRETACEO	SUPERIOR	Formación Celendín (France Chert)	Lutitas silicificadas bandeadas con intercalaciones de caliza recristalizada. El espesor de las bandas de lutita varía de 0.02 m. a 0.06 m. y las de caliza de 0.10 m. a 1.50 m.	100 metros
			Lutitas ligeramente silicificadas, finamente bandeadas.	100 metros
			Lutitas finamente bandeadas con intercalaciones de caliza.	50 metros
			Caliza recristalizada.	100 metros
			Lutitas silicificadas con intercalaciones de caliza recristalizada.	50 metros
	INFERIOR	Grupo Machay (Calizas Machay)	Caliza masiva Caliza silicificada Caliza masiva Sili de roca basáltica. Caliza marmolizada finamente bandeada. Caliza masiva con lutitas carbonáceas interbandeadas en su mitad inferior.	90 metros 5 metros 460 metros 17 metros 6 metros 150 metros

Fuente. Tomado del primer congreso Latinoamericano de minas operados por la Cerro de Pasco, nov. de 1970 (J. Pinto).

1.2.4. Geología Local

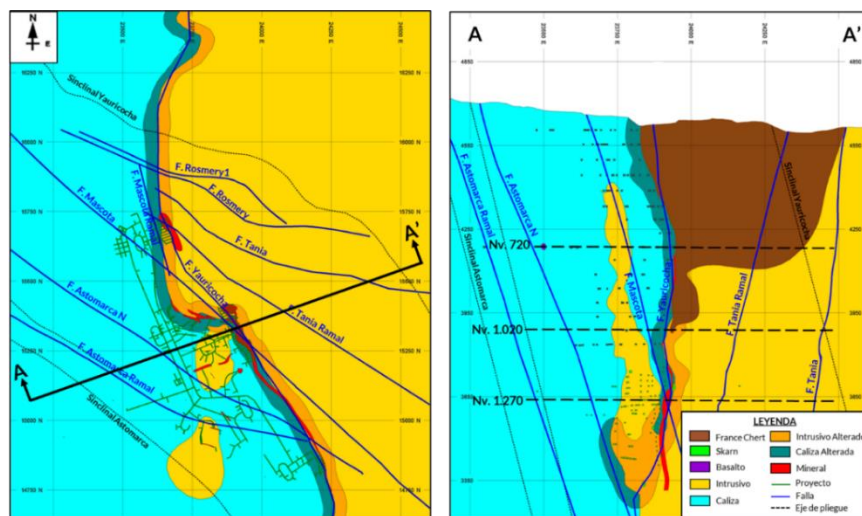
El modelo geológico local muestra que gran parte de la infraestructura de la mina, tanto actual como del proyecto de profundización, se hospeda en calizas y brechas calcáreas de la Formación Jumasha, de color gris y aspecto masivo. Sobreyacen a esta unidad de manera concordante, las lutitas silicificadas de la Formación Celendín o France Chert, cuya orientación y manto es similar al de las calizas, conformando

ambas litologías un monoclinal con rumbo N25-45°W, y un buzamiento entre 55 y 75° al NE.

Hacia el este, las calizas están en contacto con un stock de composición granodiorita a monzonita, junto con algunas apófisis, en cuerpos elongados en dirección NW-SE. Además, se presentan diques basálticos de 2 a 5 m de espesor en la zona occidental del yacimiento, intruyendo a las calizas.

La alteración de calizas e intrusivo se concentra principalmente en el contacto entre ambas litologías, formando una franja de 30 a 70 m de espesor. La interacción de los intrusivos con las calizas y lutitas provocaron que estas recrystalizaran en chert, mármol y córneas. Además, se produjeron zonas de alteración skarn, con minerales característicos como granate, wollastonita, diópsido y clorita. En el intrusivo, en tanto, la acción de fluidos de pH ácido, que circularon por el contacto entre ambas litologías, generó argilización intensa en las granodioritas y monzonitas. En la Figura 07, se muestra una planta y sección representativa del modelo geológico de la mina.

Figura 7. Vista de la planta geológica del Nivel 1.270, Piso 00 (cota 3.640 m.s.n.m.), y sección NE-SW representativa.



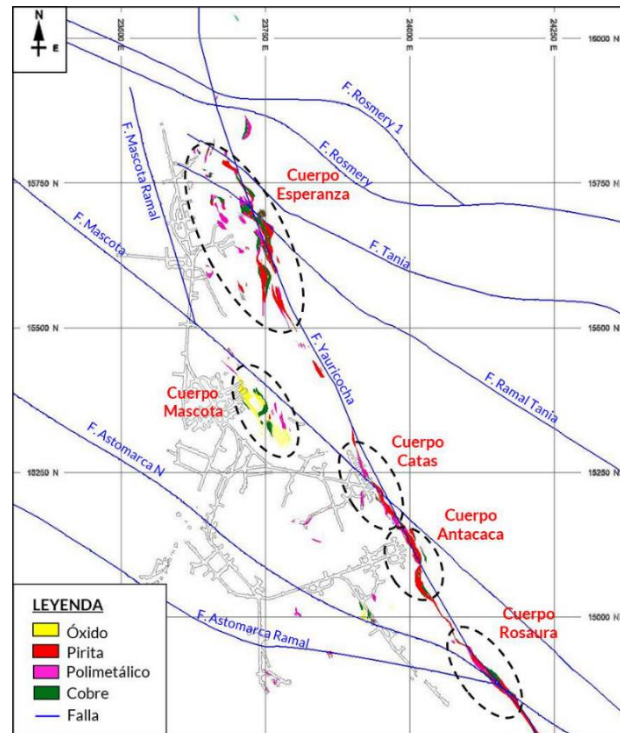
Fuente. Elaboración propia.

La mineralización en Mina Yauricocha ocurrió en al menos dos etapas, evidenciado en vetillas de cuarzo-sulfuros cortando cuerpos mineralizados de sulfuros polimetálicos. Los cuerpos minerales más grandes (Esperanza, Catas-Antacaca, Rosaura) presentan principalmente rumbo NW, con buzamiento subvertical, alcanzando extensiones de más de 650 m, y espesores variables (10 a 40 m), situándose en el contacto entre las calizas y el stock de granodiorita-monzonita. Además, existen cuerpos de menor tamaño ubicados en estas rocas calcáreas, en una posición más distal al contacto con el intrusivo, asociados a zonas de intersección con fallas mayores, tales como Mascota, Contacto Sur Medio, Contacto Occidental y Katty. Por lo tanto, existe un fuerte control de los patrones estructurales sobre la mineralización.

La clasificación de la mineralización de mena se basa en las características geometalúrgicas del yacimiento, y se divide en tres grupos principales.

- Polimetálico. incluye sulfuros de Cu y Pb-Zn, a menudo con valores relevantes de Ag. Los minerales más comunes de este grupo corresponden a esfalerita, galena, calcopirita, bornita y enargita.
- Cobre abarca sulfuros de cobre como calcopirita, bornita, tenantita-tetraedrita y covelina.
- Óxidos. corresponden principalmente a óxidos, hidróxidos y/o carbonatos resultantes de la alteración supérgena, tales como cuprita, azurita, malaquita, brochantita, crisocola, Cu nativo $\pm$ Ag y Au.

Figura 8. Planta del Nivel 1.070, Piso 00 (cota 3.840 m.s.n.m.), con distribución de la mineralización.



Fuente. Área de geomecánica.

1.2.5. Geología Estructural

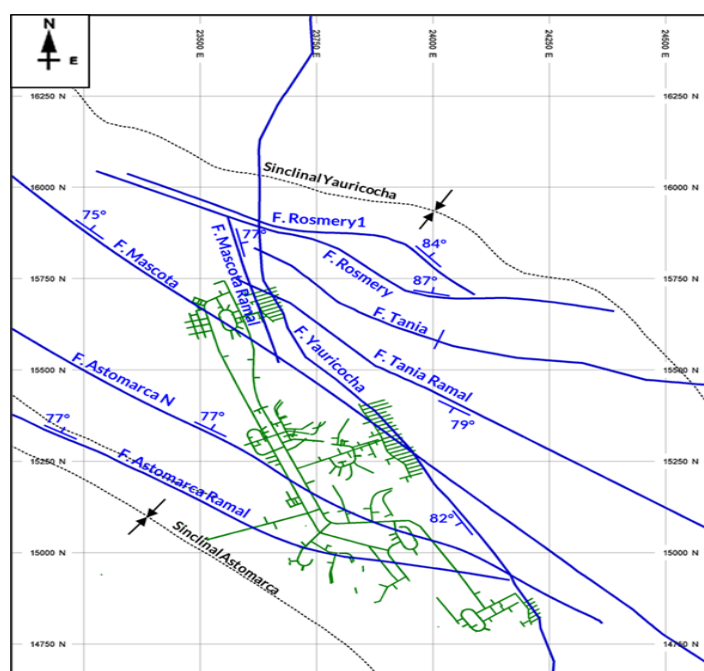
Discontinuidades Mayores

Las discontinuidades mayores corresponden a estructuras tales como fallas, ejes de plegamiento y contactos que cortan gran parte o la totalidad de un yacimiento. A escala regional y distrital, el rasgo estructural más importante del sector es un conjunto de estructuras con orientación NW, pertenecientes al Sistema de Fallas Chonta. Estas estructuras presentan un comportamiento inverso, y evidencian dos episodios principales de movimiento en el rumbo (Rodríguez y Carlotto, 2008).

En Mina Yauricocha, el elemento estructural principal corresponde a la Falla Yauricocha, de rumbo medio N10°W y buzamiento de 82° al SW, con un halo de fracturamiento medio de 14 m, y que pone en contacto a las calizas de la Formación Jumasha con el intrusivo granodiorítico-monzonítico. Otros rasgos importantes

corresponden a las fallas Astamarca Norte y Mascota, de rumbo N45°W y manteo de 75-77° al NE, con un halo fracturado medio de 13 m; las fallas Tania y Rosmery, de orientación N55- 70°W y buzamiento de 87° a subvertical (espesor halo de falla de 12 a 13 m), junto con los ramales asociados a cada una de estas estructuras, cuyos anchos de las zonas de fracturamiento son menores (2 a 9 m). Se reconocen, además, ejes de plegamiento de los sinclinales Astamarca y Yauricocha. En la Figura 09, se muestra una planta representativa con las discontinuidades mayores presentes en el yacimiento.

Figura 9. Planta del Nivel 1.270, Piso 00 (cota 3.640 m s.n.m.), con discontinuidades mayores de mina Yauricocha.



Fuente. Área de geomecánica

Dominios estructurales

Los dominios estructurales corresponden a volúmenes en los cuales la orientación de los sets de discontinuidades, tales como fallas o diaclasas, presenta similitudes en sus patrones en comparación a los alrededores. Los patrones de discontinuidades intermedias y menores están controlados por la interacción de estructuras mayores, de escala distrital y regional, cuya formación y cinemática es

determinada por las fases tectónicas ocurridas a lo largo de la historia geológica. Para definir los dominios estructurales, se utilizó la información geológica y estructural del mapeo de celdas y galerías, lineamientos superficiales, en conjunto con datos bibliográficos sobre la evolución tectónica del sector.

Luego de la depositación de la secuencia de calizas y rocas siliciclásticas del Cretácico al Paleoceno, la tectónica regional cambió a un régimen compresivo, generándose cabalgamientos de fallas inversas que mantean hacia el NE, y plegamiento intenso de rumbo NW, siguiendo la orientación regional del Sistema de Fallas Chonta. Según interpretaciones del movimiento de las placas tectónicas e indicadores cinemáticos, los esfuerzos compresivos oblicuos a la Placa Sudamericana provocaron desde fines del Cretácico hasta el Cenozoico, además, desplazamientos en el rumbo en las fallas principales.

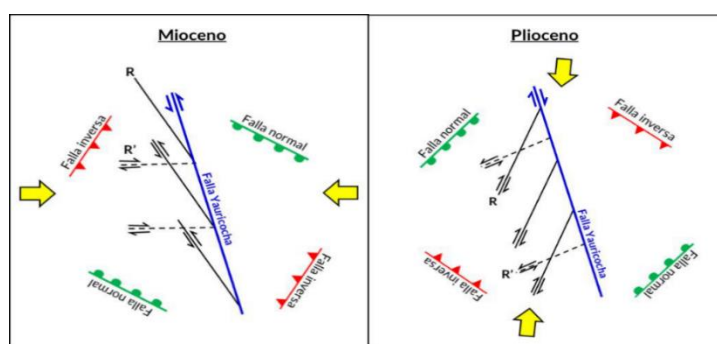
De acuerdo con el modelo de cizalle de Riedel (1929), cuando los esfuerzos principales son oblicuos a la falla principal, existe un conjunto de fracturas subsidiarias que presentan su misma cinemática (sintéticas), y otras que presentan un desplazamiento opuesto en el rumbo (antitéticas). Además, se encuentran orientaciones donde se produce extensión, y otras donde se genera compresión.

Durante la última parte del Neógeno, se desarrollaron sucesivos pulsos compresivos, asociados principalmente con la Fase Quechua (Dalmayrac, 1986; Rodríguez y Carlotto, 2008). En el Mioceno superior, los esfuerzos principales orientados E-W dieron paso a una cinemática sinistral en las fallas principales, lo que permitió el ascenso del intrusivo y la formación del depósito mineral. En el área de estudio, si se considera la Falla Yauricocha como estructura principal, se espera la ocurrencia de fracturas sintéticas orientadas N25-35°W, y planos de extensión N60-65°W, correspondiendo de manera coherente al rango en el que oscila el rumbo de los

cuerpos mineralizados. Al mismo tiempo, se espera la conformación de fracturas antitéticas y planos de compresión orientados E-W y N35°E, respectivamente, lo que se refleja en el mapeo de galerías, al observarse truncamiento de los cuerpos mineralizados en tales direcciones.

Posteriormente, a inicios del Plioceno, ocurrió un nuevo pulso compresivo, pero con una orientación NNE-SSW, provocando que la cinemática de la Falla Yauricocha y fracturas sintéticas sean del tipo dextral, dislocando a los cuerpos mineralizados en el rumbo, mientras que las estructuras NW sufrieron compresión, cerrando los espacios por donde circularon los fluidos magmáticos e hidrotermales. En la Figura 10, se muestran esquemas del modelo de Riedel para la Falla Yauricocha, con los esfuerzos que predominaron durante la formación del yacimiento.

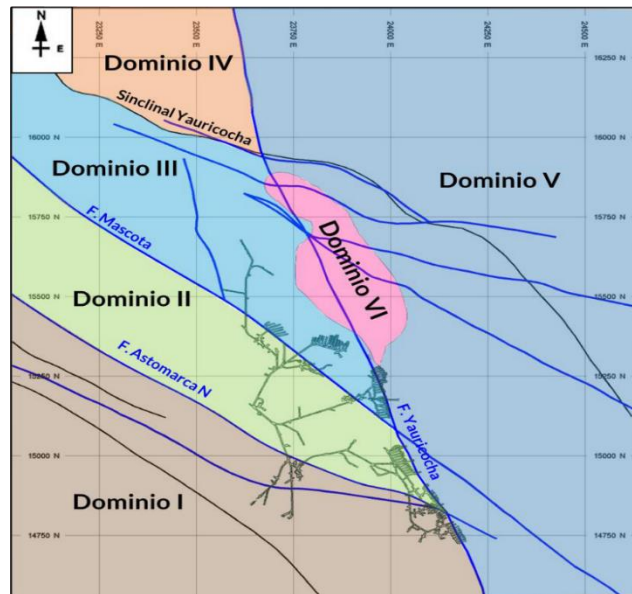
Figura 10. *E Modelo de Riedel (1929) aplicado en falla Yauricocha.*



Fuente. E-mining Technology

A partir de esta conceptualización, se realizó una sectorización en bloques limitados por discontinuidades mayores, con el objetivo de identificar y establecer sistemas de discontinuidades, agrupando los bloques que contengan similitudes en sus patrones. Como resultado, en Mina Yauricocha se han definido seis (6) dominios estructurales, que están limitados por fallas mayores, contactos litológicos y un plano axial. En la Figura 11, se muestra una planta representativa, con la distribución de los dominios estructurales.

Figura 11. Planta del Nivel 820, Piso 00 (cota 4.090 m s.n.m.), con dominios estructurales.

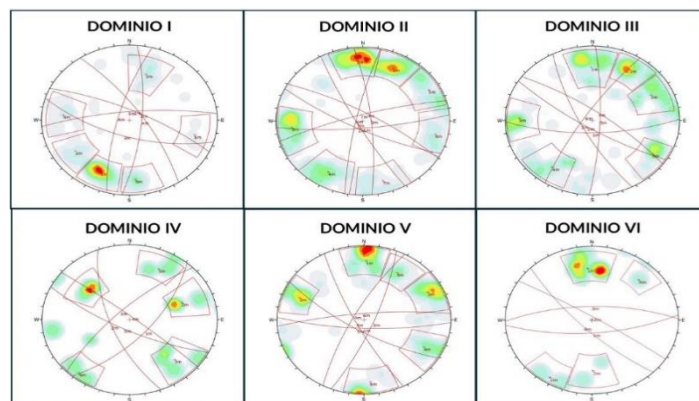


Fuente. E-mining Technology

Discontinuidades intermedias

Los sistemas de discontinuidades intermedias corresponden a fallas y contactos litológicos a escala de galerías. Se analizan en forma estadística, lo que permite clasificarlas en diversas familias o sistemas de discontinuidades. En la Figura 12, se muestran las proyecciones estereográficas para cada dominio estructural, y en la Tabla 2 se resumen sus orientaciones y variabilidad.

Figura 12. Proyección estereográfica de dominios estructurales, para las discontinuidades intermedias.



Fuente. E-mining Technology

Tabla 2. Orientación de las discontinuidades intermedias

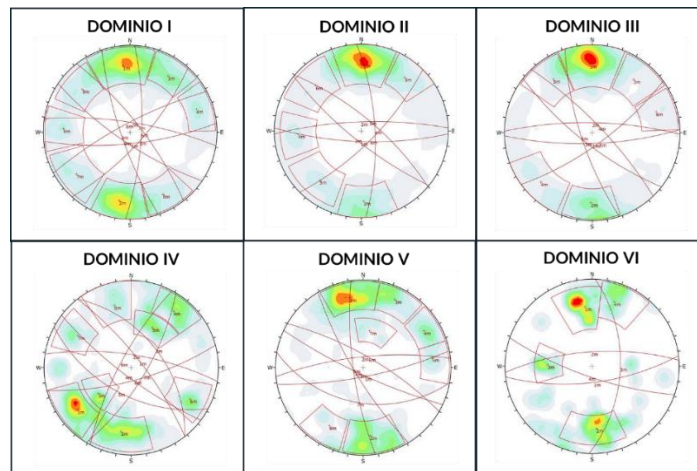
Dominio	Sistema	Dip			Dip Direction		
		Mín.	Media	Máx.	Mín.	Media	Máx.
I	1	60	75	87	8	25	38
	2	56	73	85	39	56	70
	3	45	65	80	181	197	210
	4	56	74	85	79	95	112
	5	63	77	88	336	355	5
	6	61	75	84	264	285	302
II	1	63	79	89	158	175	190
	2	63	77	89	192	206	220
	3	60	79	88	66	84	95
	4	60	77	89	11	30	46
	5	62	82	88	225	241	256
	6	65	81	89	262	282	297
	7	64	80	89	326	344	4
III	1	50	71	87	163	179	195
	2	62	78	87	199	212	228
	3	55	74	86	231	243	259
	4	62	76	87	20	36	54
	5	64	80	88	73	92	107
	6	64	79	88	291	303	324
IV	1	47	63	77	111	131	148
	2	50	65	85	231	249	265
	3	56	73	88	294	316	332
	4	69	85	88	24	39	52
	5	63	74	85	187	206	222
V	1	63	77	89	162	182	197
	2	66	77	89	96	112	128
	3	63	79	89	230	243	260
	4	59	76	88	282	298	314
	5	58	73	86	199	211	227
	6	67	80	89	340	355	9
VI	1	58	70	80	163	176	191
	2	69	85	89	23	32	50
	3	60	69	78	349	359	7
	4	64	75	87	211	225	238

Fuente. E-mining Technology

Discontinuidades menores

Se consideran como discontinuidades menores principalmente a las diaclasas o joints, que se presentan como sistemas de discontinuidades y son analizados de manera estadística. En la Figura 13, se muestran las proyecciones estereográficas de los sistemas de discontinuidades menores, y en la Tabla 3, se resumen sus orientaciones y variaciones.

Figura 13. Proyección estereográfica de dominios estructurales, para las discontinuidades menores.



Fuente. E-mining Technology

Tabla 3. Orientación de las discontinuidades menores

		Dip			Dip Direction		
		Mín.	Media	Máx.	Mín.	Media	Máx.
I	1	59	75	89	149	174	197
	2	61	77	90	348	9	28
	3	65	76	89	198	214	231
	4	68	78	88	234	251	269
	5	60	73	87	114	132	148
	6	60	75	88	77	93	108
	7	60	76	88	32	52	73
	8	63	78	87	313	332	347
II	1	57	76	90	160	182	204
	2	65	78	90	335	358	17
	3	63	77	90	206	219	237
	4	55	72	86	69	87	104
	5	58	73	86	20	40	63
	6	57	73	88	113	135	154
III	1	55	76	90	157	178	202
	2	65	77	89	341	1	21
	3	58	75	88	204	218	237
	4	64	78	90	24	46	70
	5	55	74	88	124	144	156
	6	59	75	89	239	252	267
IV	1	68	76	88	36	52	70
	2	60	73	87	346	9	30
	3	32	51	60	36	52	75
	4	68	78	88	200	217	233
	5	43	55	65	185	208	232
	6	56	75	87	284	298	309
	7	58	71	81	108	121	132
	8	60	73	88	146	165	178
	1	67	78	88	151	169	190

V	2	63	76	88	330	6	12
	3	68	81	89	192	205	222
	4	66	78	88	227	239	250
	5	66	77	88	252	262	280
	6	64	75	86	16	30	44
	7	33	46	56	170	190	222
VI	1	50	69	84	150	173	187
	2	58	71	83	334	4	23
	3	38	54	67	73	92	113
	4	59	76	88	187	199	222

Fuente. E-mining Tecnology

1.2.6. Estructura mineralizada

La mineralización presente en el depósito mineral de Yauricocha está formada principalmente por Cuerpos mineralizados, cuya mineralización está conformada por: pirita, cuarzo, enargita, chalcopirita, bornita, covelita en el núcleo y parte central de los cuerpos; y masas sueltas de pirita friable, galena, esfalerita junto con algo de calcopirita en una ganga de calizas, arcilla y cuarzo en la periferia. Asimismo, la presencia de Au nativo se halla asociado a dichos sulfuros. También la mineralización se presenta en cuerpos oxidados como el caso del cuerpo Mascota, dentro de la mas de óxidos, se encuentran minerales de plomo (Cerusita), minerales de Plata y presencia de oro asociados a la plata y al fierro.

1.2.7. Recursos y reservas

Las reservas representan la parte económicamente explotables de un recurso geológico con categoría medido e indicado, para ello es necesario el uso de factores modificadores los cuales en la manera posible tratan de definir la parte de mineral que debe ser extraída en el futuro.

La última estimación de reservas interna realizadas en la Unidad de Acumulación Yauricocha presenta como fecha de corte a los recursos geológicos medidos e indicado el 30 de Junio'24. Estimándose de esta manera un total de 6,063,879 TMS con leyes de 0.99 OzAg, 0.34% Pb, 1.03% Cu, 1.70%Zn, 0.37 GrAu y 103.3 \$/t

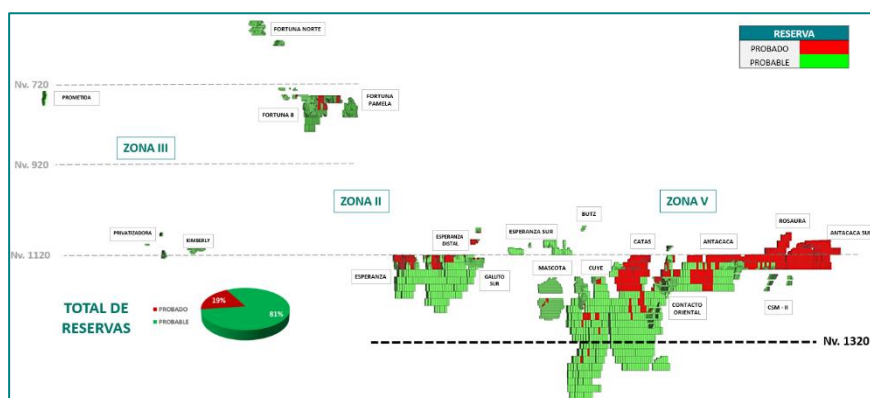
en NSR. Asimismo, se distribuyen en las 3 zonas con una distribución de; 1% - Zona III, 29% Zona II y 70% - Zona V.

Tabla 4. Estimación de reservas en la Unidad de Acumulación Yauricocha.

ZONA	CATEGORIA	Ton(t)	Ag (Oz/t)	Pb (%)	Cu (%)	Zn (%)	Au (gr/t)	As (%)	Fe (%)	NSR (\$/t)
II	PROBADO	428,572	1.90	0.79	1.55	2.11	0.41	0.26	24.20	157.55
	PROBABLE	1,344,168	1.81	0.73	1.23	2.30	0.32	0.23	20.30	138.54
	Subtotal	1,772,740	1.83	0.75	1.31	2.25	0.34	0.24	21.24	143.13
III	PROBABLE	33,376	4.27	0.32	1.16	3.00	0.29	0.05	15.71	167.33
	Subtotal	33,376	4.27	0.32	1.16	3.00	0.29	0.05	15.71	167.33
II	PROBADO	744,764	0.56	0.09	0.69	1.36	0.35	0.11	21.27	70.32
	PROBABLE	3,512,999	0.62	0.19	0.95	1.47	0.39	0.09	22.06	89.61
	Subtotal	4,257,763	0.61	0.17	0.91	1.45	0.38	0.10	21.92	86.24
Total		6,063,879	0.99	0.34	1.03	1.70	0.37	0.14	21.69	103.32

Fuente. Área de Planeamiento

Figura 14. Estimación de reservas en la Unidad de Acumulación Yauricocha.



Fuente. Área de planeamiento

Los cuerpos mineralizados catalogados como masivos y extraídos a través del método de Sub Level Caving son. Antacaca, Antacaca Sur, Catas, Esperanza, Esperanza Distal, Esperanza Sur, Fortuna Pamela, Fortuna 8, Marita y Rosaura. Estos representan el 88% del total de la producción para el 2025, la principal estrategia utilizada es realizar las preparaciones e infraestructura necesarias en el primer trimestre con el objetivo de obtener una mina preparada y desarrollada para 2 meses de vida y de esta manera mantener un aporte constante hacia adelante y una oportunidad de contingencia ante cualquier imprevisto.

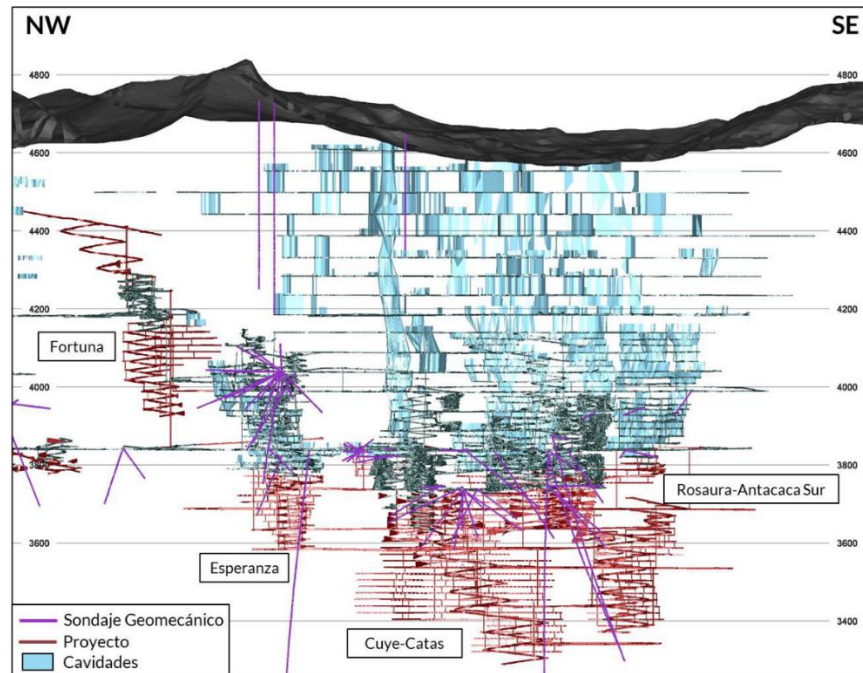
Los cuerpos mineralizados considerados como Cuerpos chicos son. Butz, Contacto Occidental, Contacto Oriental, CSM-0, CSM-I, CSM-II Fortuna 7, Gallito

Sur, Katty, Mascota Polimetálico Este, Norte, Norte II, Sur y Sur II. Estos cuerpos representan el 22% del total de la producción para el 2025, a pesar se conformar varias estructuras, el aporte se encuentra limitado por los métodos utilizados, los cuales son el Corte y Relleno Ascendente – OCF como el Sub Level Stoping – SLS. Sin embargo, su explotación es necesaria porque son los cuerpos reguladores de ley polimetálica para el plan de producción.

1.2.8. Descripción de la mina

La operación principal de Yauricocha se localiza en la Mina Central, siendo el cuerpo Esperanza el más relevante y donde se aplica exclusivamente el método de Sub Level Caving. La infraestructura de acceso comprende el Pique Central y el Túnel Yauricocha (de 5 km de longitud), que facilita la conexión con la planta Chumpe. La mina cuenta con una red de excavaciones subterráneas (rampas, galerías, cruceros y chimeneas) para acceder a las distintas zonas. La extracción se segmenta. el mineral del cuerpo Esperanza en niveles profundos se conduce al Pique Central, y el de los cuerpos Catas y Rosaura al Pique Mascota, siendo el Túnel Yauricocha el punto de evacuación final de todo el material.

Figura 15. Vista isométrica de distribución de sondajes diamantinos con información geomecánica.



Fuente. Área de planeamiento

1.2.9. Método de explotación

En mina Yauricocha existen tres métodos de explotación. Sublevel Caving, Over Cut and Fill y Sublevel Stopping. Estos métodos son utilizados en los diferentes cuerpos de acuerdo con su geometría y condición geomecánica.

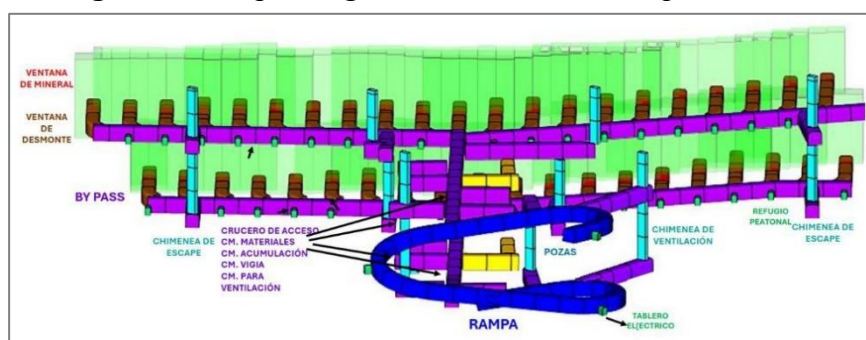
Sub level caving.

En Mina Yauricocha, la calidad de la roca no permite la formación de unidades independientes y estables, por lo que resulta conveniente una explotación masiva, controlando el hundimiento. Es por esto, que el método empleado es principalmente el SLC, el cual es un sistema de explotación masiva que ofrece ventajas operativas cuando los riesgos geotécnicos son controlados.

El SLC debe ser ejecutado de forma descendente, mediante subniveles de producción dispuestos a lo largo del cuerpo mineralizado, con desfase vertical, lo que

facilita el flujo de material fragmentado hacia los niveles inferiores. En cada subnivel, deben existir ventanas de producción paralelas a lo ancho del cuerpo mineralizado para optimizar la recuperación del mineral, minimizando la dilución. Estas labores paralelas se conectan entre sí en un extremo del cuerpo, fuera de la zona mineralizada, mediante galerías de acceso, las cuales permiten el carguío y transporte del mineral. La Figura 16, muestra un esquema del método.

Figura 16.. Esquema general del método de explotación slc.

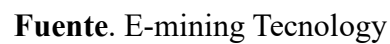


Fuente. E-mining Technology

Actualmente, en Mina Yauricocha se está aplicando una variante del método Sub Level Caving (SLC), la cual se caracteriza por el uso de “Bolsillos”, el cual requiere de una exigencia operacional importante mermando los ritmos de extracción, la cual se utiliza con el objetivo de mitigar y controlar el riesgo de soplos, sin tener resultados favorables. Es por ello que, uno de los objetivos del estudio es optimizar el método migrando a SLC convencional al mismo tiempo que se proponen medidas para predecir y controlar los riesgos geotécnicos asociados. A continuación se describe la variante utilizada en la mina y el método propuesto (SLC convencional).

La variante de SLC aplicada en Yauricocha considera generar cara libre para cada corrida de producción en la zona inferior de la unidad. A esta abertura en la zona inferior se le conoce como “bolsillos” y provoca que se forme una geometría de techo

Figura 17. Esquema de secuencia de explotación con bolsillos.



Este método de explotación se basa en la extracción gradual del mineral mediante la creación de subniveles. Se inicia con la perforación y voladura de un bloque de mineral desde el subnivel inferior, y luego se permite que el mineral se desplace hacia abajo por gravedad. La roca cedida facilita la extracción continua del mineral.

22

Sub Level Stopping.

Este método implica la creación de subniveles horizontales en diferentes pisos. Se perforan barrenos verticales desde un subnivel superior hasta uno inferior, se realiza voladura para fragmentar el mineral, se extrae y transporta el material. Este proceso se repite de forma continua mientras la minería progresa hacia abajo del cuerpo.

La estabilidad del macizo rocoso circundante es esencial para garantizar la seguridad y se emplean medidas de sostenimiento tales como cable bolting, Shotcrete y pernos expansivos. Es aplicable a una variedad de minerales y requiere consideraciones geológicas y de seguridad. En Yauricocha se utiliza este método en cuerpos como Fortuna 7.

Figura 18. Representación gráfica del método de minado SLS, parte superior de la fotografía, subnivel superior; parte inferior de la fotografía (sub nivel inferior)

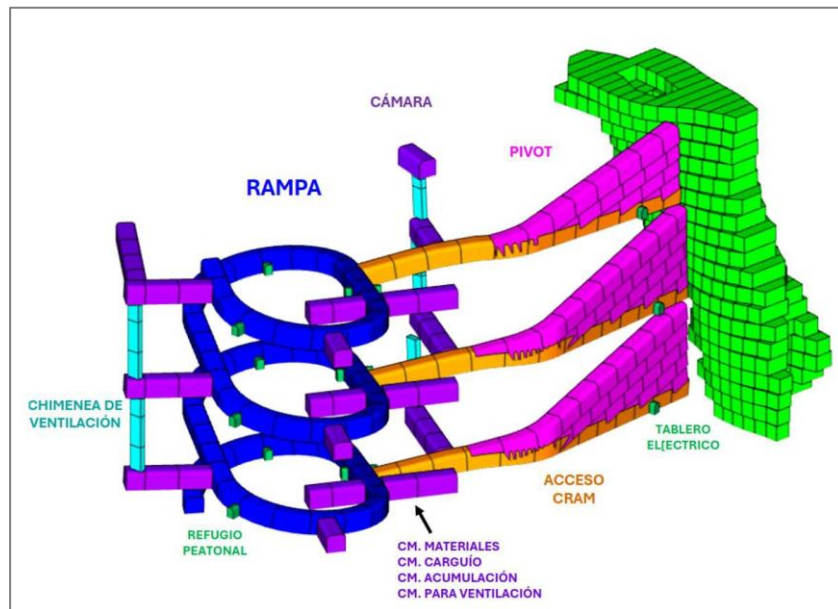


Fuente. Tomado del libro de “Geotechnical Design For Sublevel Open Stopping”

Over Cut and Fill

El método “Cut and Fill” (corte y relleno) consiste en extraer el mineral a través del desarrollo de galerías dentro de la zona mineralizada, a estas labores se les llama corte, luego esta galería es rellena sirviendo de piso para el nivel superior, este ciclo se repite hasta completar un nivel, el cual está compuesto por 5 cortes. El acceso a las labores de producción se realiza a través de pivotes, tal como se muestra en la Figura 19.

Figura 19. Esquema general del método Cut and Fill

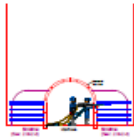
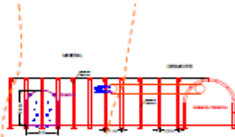
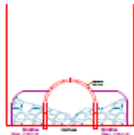
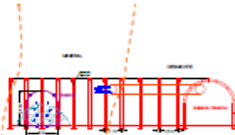
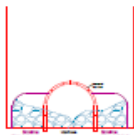
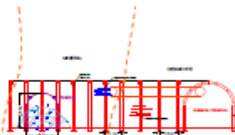
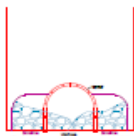
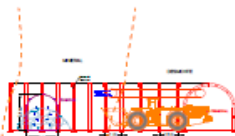
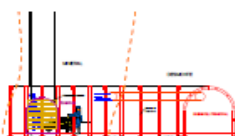
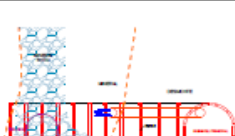
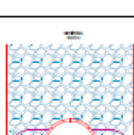
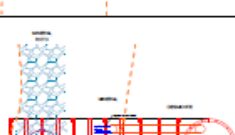
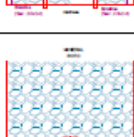
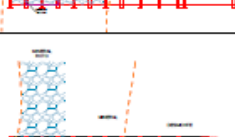


Fuente. E-mining Technology

Este método es utilizado para cuerpos altamente irregulares y de poca resistencia del macizo. Se ingresa inicialmente al cuerpo mediante galerías donde se define o contornea el cuerpo, realizando en cada avance el estricto sostenimiento. Posteriormente, la cámara se rellena con material estéril para garantizar la estabilidad. Este proceso se repite de manera descendente a medida que la explotación avanza en profundidad.

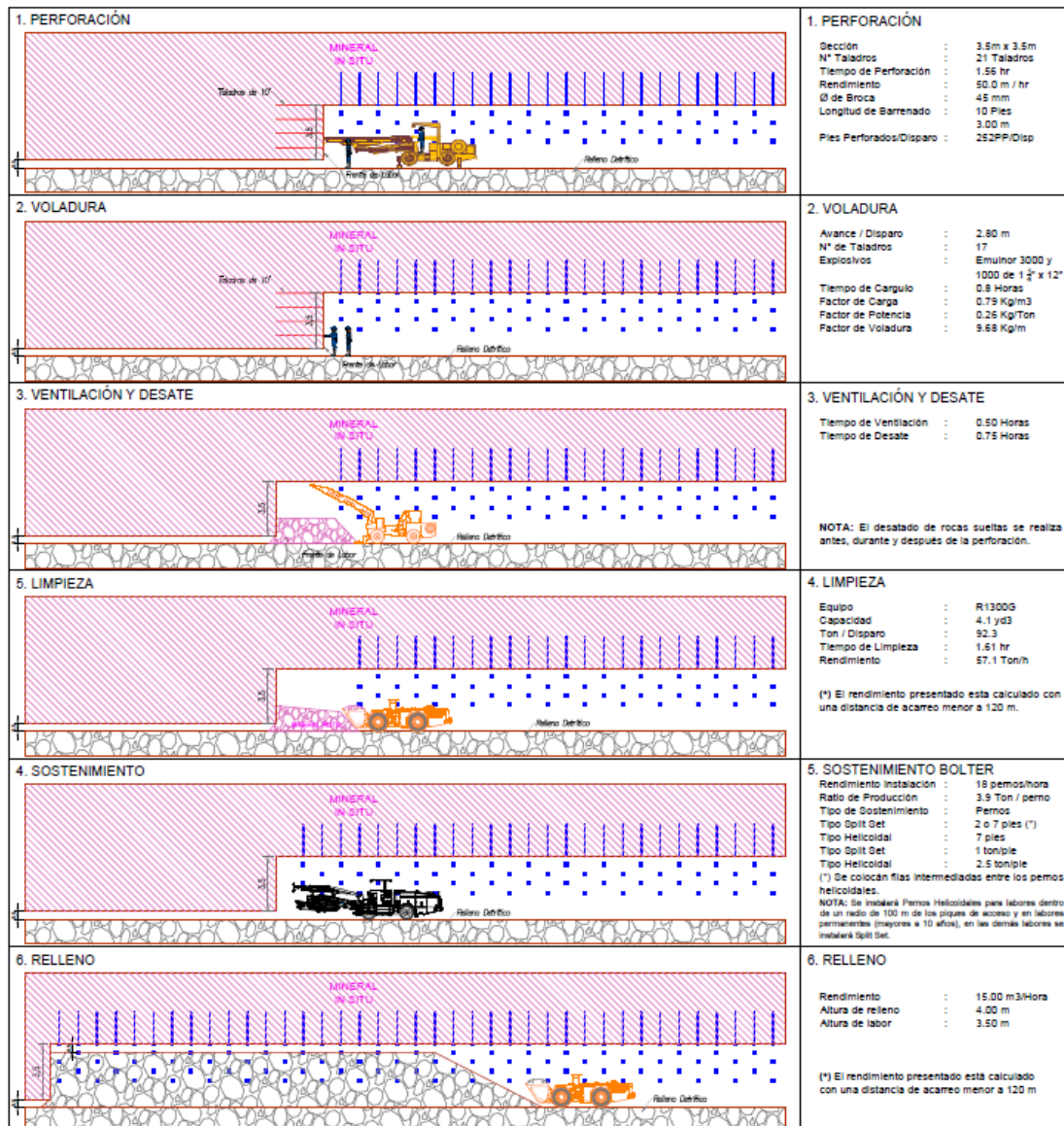
En Yauricocha tenemos cuerpos donde utilizamos el método de OCF, generalmente son cuerpos chicos donde las potencias son reducidas de los cuales tenemos Carmencita, Sulma, Privatizadora, Fortuna 7, Contacto Sur medio, Contacto Occidental, Katy.

Figura 20. Ciclo de minado Sub Level Caving, 2 horas, RMR. 21-30 (Tipo IV-B)

1. PERFORACION DE BOLSILLOS  	1. PERFORACIÓN Sección : 2.0m x 2.4m N° de Taladros : 20 Tiempo de Perforación : 2.6 horas Rendimiento : 18 m/horas Ø de Broca : 38 mm Longitud de Barrenado : 8 Pies 2.40 m Pies Perforados/Disparo : 160 PPI/Disp
2. VOLADURA DE BOLSILLOS  	2. VOLADURA Sección : 2.0m x 2.4m Avance / Disparo : 2.10 m Emulnor 1000 y : 3000 de 1 1/2" x 12" Explosivos : Tiempo de Cargulo : 0.75 Horas Factor de Carga : 1.54 Kg/m3 Factor de Potencia : 0.58 Kg/Ton Factor de Avance : 6.66 Kg/m
3. VENTILACIÓN  	3. VENTILACIÓN Tiempo de Ventilación : 0.70 Horas NOTA: Por seguridad del personal no se expondrá a realizar el desatado de rocas después de disparar el bolsillo
4. LIMPIEZA DE BOLSILLOS  	4. LIMPIEZA Equipo : R1300G Capacidad Equipo : 4.1 yd3 Rendimiento(*) : 60.78 Tn/Horas (*) El rendimiento presentado esta calculado con una distancia de acarreo menor a 50 metros.
5. PERFORACION DE TALADROS LARGOS  	5. PERFORACIÓN TL Sección : N° de Taladros : 19 Tiempo de Perforación : 3.10 horas Rendimiento : 38.06 m/horas Ø de Broca : 64 mm Pies Perforados/Disparo : 396.6 PPI/Disp
6. VOLADURA DE TALADROS LARGOS  	6. VOLADURA TL Avance / Disparo : N° de Taladros : 19 Explosivos : Emulnor Tiempo de Cargulo : 2.40 horas Factor de Potencia : 0.19 Kg/Tn Factor de Carga : 0.45 Kg/m3
7. VENTILACIÓN  	7. VENTILACIÓN Tiempo de Ventilación : 0.5 Horas NOTA: Por seguridad del personal no se expondrá a realizar el desatado de rocas después de la voladura.
8. LIMPIEZA  	8. LIMPIEZA Equipo : R1300G Capacidad Equipo : 4.1 yd3 Rendimiento (*) : 60.78 Tn/Horas (*) El rendimiento presentado esta calculado con una distancia de acarreo menor a 50 metros.

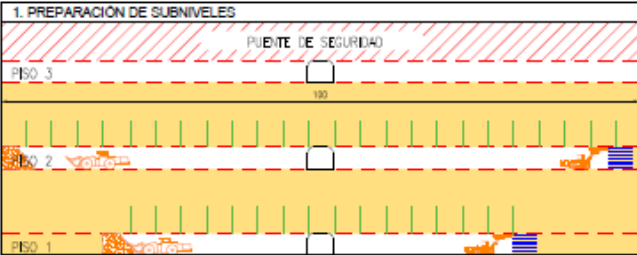
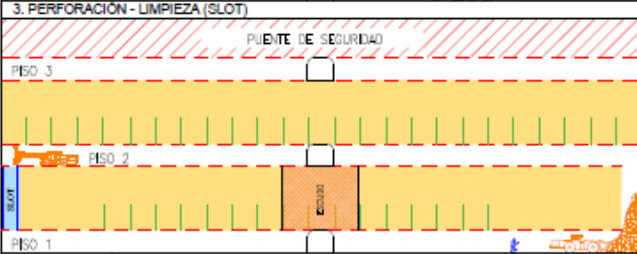
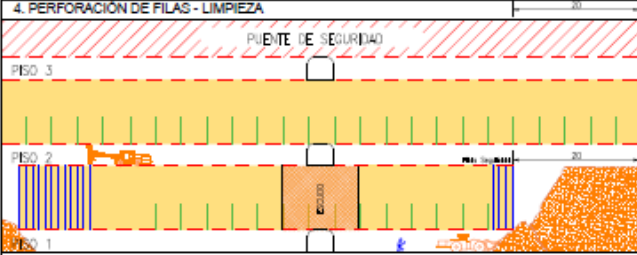
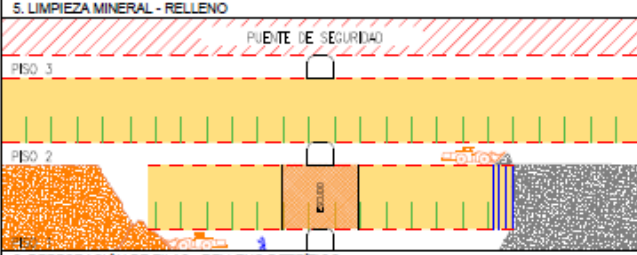
Fuente. Área de planeamiento

Figura 21. Ciclo de minado corte y relleno ascendente mecanizado con jumbo, 7 días, RMR. 41-50 (Tipo III-B)



Fuente. Área de planeamiento

Figura 22. Ciclo de minado Sub Level Stopping mecanizado con Jumbo y Raptor/Muki, RMR 31-50 (Tipo IIIB/IVA)

1. PREPARACIÓN DE SUBNIVELES 	1. PREPARACIÓN DE SUBNIVELES Labor : Subnivel Subnivel : 3.5m x 3.5m Bancos : 2 Altura Banco : 10m Longitud de Tajo : 100m Equipo : Jumbo Frontonero Scoop
2. SOSTENIMIENTO 	2. SOSTENIMIENTO Labor : Subnivel Subnivel : 3.5m x 3.5m Elemento Sost. : Shot/Perno/Malla Refuerzo : Cable Bolting 6-9m Equipo : Robot / Mixer
3. PERFORACIÓN - LIMPIEZA (SLOT) 	3. PERFORACIÓN - LIMPIEZA (SLOT) Labor : Slot Sección : 2.0m x 2.0m Dist. Telemando : 20m Equipo : Raptor / Scoop
4. PERFORACIÓN DE FILAS - LIMPIEZA 	4. PERFORACIÓN DE FILAS - LIMPIEZA Labor : Tajo Dist. Telemando : 20m Equipo : Raptor / Scoop Diámetro Taladro : 64mm (*) El espaciado entre filas depende del tipo de roca, teniendo mallas de 1.0m x 1.0m y 1.2m x 1.2m.
5. LIMPIEZA MINERAL - RELLENO 	5. LIMPIEZA MINERAL - RELLENO Labor : Tajo Rendimiento : 57.1 Ton/h Long. Acarreo : 100 - 120m Equipo : R1300G Capacidad : 4.1 yd3 (*) El rendimiento presentado está calculado con una distancia de acarreo menor a 120 m.
6. PERFORACIÓN DE FILAS - RELLENO DETRÍTICO 	6. PERFORACIÓN DE FILAS - RELLENO DETRÍTICO Labor : Tajo Rendimiento Perf. : 200 m/d Long. Acarreo : 100 - 120m Rend. Relleno : 22 m3/hora Filas de Seguridad : 4 LMA : 20 m (*) El Límite Máximo de Abertura varía dependiendo del tipo de roca, 15m para Tipo IVA y 25m para Tipo IIIB.

Fuente. Área de planeamiento

1.2.10. Potenciales mecanismos de inestabilidad y escalas de análisis

Mina Yauricocha se desarrolla principalmente en un entorno geológico compuesto por rocas sedimentarias e ígneas, que presentan en general calidades de roca de regular a buena. Sin embargo, a tal como lo indica el modelo geotécnico, se identifica una banda de alteración en el contacto litológico entre las calizas y el intrusivo, la cual está directamente asociada con la mineralización, y se caracteriza por calidades de roca de muy mala a regular. En cuanto al estado de esfuerzos, el proyecto del cuerpo Pamela se encuentra afectado por un minado de profundización se emplazará a profundidades mayores a 1.200 metros, lo cual implica una condición de esfuerzos exigente.

Para este estudio se identificaron los Potenciales Mecanismos de Inestabilidad (PMI) que surgen de la interacción entre el método de explotación y el modelo geotécnico. Los PMI también pueden ser asociados a peligros, los cuales representan condiciones geotécnicas desfavorables. Dichos mecanismos fueron clasificados según su escala de análisis: escala global, unidad de explotación (escala intermedia) y galería (escala local).

A continuación, se describen los principales mecanismos de inestabilidad que se presentarán bajo las condiciones descritas anteriormente.

Zonas con concentraciones de esfuerzos

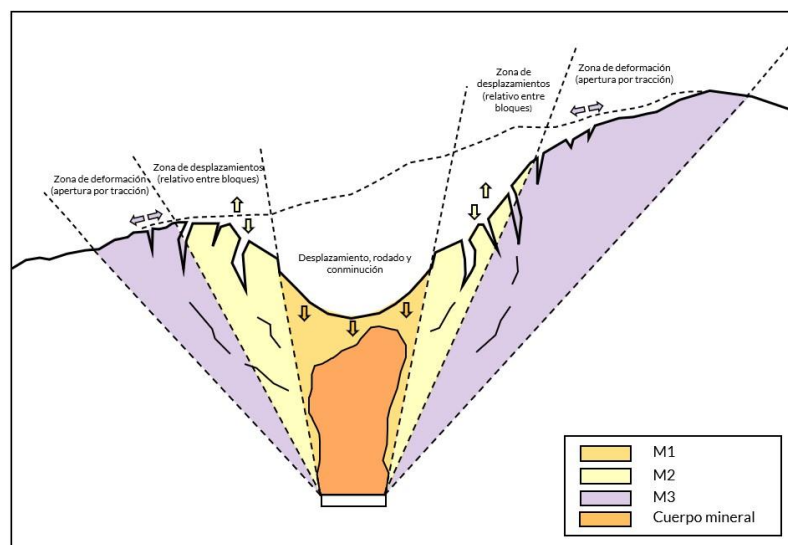
Como se mencionó anteriormente, el proyecto se encontrará sometido a condiciones de un minado emplazado a profundidades mayores a 1.200 metros, lo que implicará condiciones de esfuerzos exigentes debido a las altas presiones en esas profundidades. Además, el método de hundimiento inducirá una redistribución no uniforme de los esfuerzos, generando zonas de concentración, así como también

zonas desconfiadas. Estas condiciones deben ser identificadas para garantizar la integridad y seguridad de la infraestructura en este entorno.

Subsidencia

La explotación minera a través de métodos de caving genera una mecánica de ruptura y desplazamientos del macizo rocoso, que en su zona de interacción con superficie configura una zona de subsidencia. Usando como base el modelo conceptual de subsidencia de Woo & Eberhardt (2009), se reconocen tres tipos de materiales, los cuales se diferencian principalmente por su grado de fracturamiento y distribución espacial de la mecánica de subsidencia. En la Figura 23 se presenta una sección esquemática del modelo de subsidencia con los tres tipos de materiales.

Figura 23. Sección esquemática del modelo de subsidencia



Fuente. E-mining Technology

A continuación, se definen los materiales presentes en el modelo.

M1 (Material quebrado).

Corresponde a un material fragmentado, asociado con el proceso de hundimiento, con transporte y reducción de tamaño de partículas in situ (conminución). Se espera una alta variabilidad del tamaño de partículas.

M2 (Material fracturado con altas deformaciones).

Corresponde a una zona fracturada con evidentes movimientos de terreno (movimiento relativo entre bloques), identificables a simple vista en forma de grietas abiertas, escarpes, volcamiento de bloques y otros.

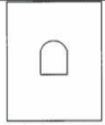
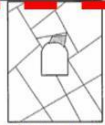
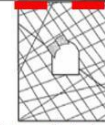
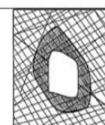
M3 (Material fracturado con bajas deformaciones).

Se asocia a una zona con movimiento de terreno menores, muchas veces no identificable a simple vista, puede ser detectable con monitoreo de deformaciones.

1.2.11. Escala galería o escala local

La Figura siguiente presenta los potenciales mecanismos de inestabilidad que se pueden encontrar presentes en calizas e intrusivos, donde la calidad geotécnica es de regular a buena (RMR89 de 40 a 70) y las condiciones de esfuerzos bajo, intermedio y altos. Bajo estas condiciones es posible encontrar mecanismos como la caída de bloques o cuñas con control estructural, derrumbe progresivo de galería por mala calidad de macizo rocoso, deformación por altos esfuerzos en rocas dúctiles (Squeezing), daño y liberación de energía repentina por altos esfuerzos en roca competente (Mecanismo tipo rock burst).

Figura 24. Potenciales mecanismos de inestabilidad a escala de galería en caliza e intrusivo

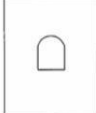
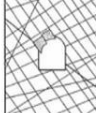
	ROCA COMPETENTE		ROCA DE MALA CALIDAD	
	Roca Masiva (RMR>75)	Moderadamente Fracturada (50<RMR<75)	Altamente Fracturada (30<RMR<50)	Roca muy mala o zonas de falla (RMR<30)
Bajo nivel de esfuerzos In-situ ($\sigma_1/\sigma_c < 0.15$)	 Roca masiva de comportamiento elástico SRF: 1.0	 Zona de fracturas aisladas, roca competente, formación de bloques o cuñas. SRF: 1.0	 Macizo rocoso fracturado, sensible a caída de bloques menores. SRF: 2.5-5.0	 Macizo de mala calidad sensible a derrumbe progresivo SRF: 5.0-7.5
Intermedio nivel de Esfuerzos In-situ (0.15< σ_1/σ_c <0.4)	 Fallamiento frágil adyacente a excavación SRF: 1.0-2.0	 Fallamiento frágil y/o movimiento de bloques SRF: 1.0-2.0	 Fallamiento frágil y derrumbe progresivo SRF: 2.5-7.5	 Macizo de mala calidad con deformaciones y/o derrumbes inmediatos post-excavación SRF: 7.5-10.0
Alto nivel de Esfuerzos In-situ ($\sigma_1/\sigma_c > 0.4$)	 Fracturamiento frágil intenso en entorno de excavación. SRF: 5.0-7.5 (*)	 Fracturamiento frágil intenso en y activación de estructuras. SRF: 7.5-10.0 (*)	 Deformación elástico-plástica. SRF: 10-20 (*)	 Deformación elástico-plástica intensa y continua. SRF: 20-50 (*)

(*) Se tienen estimaciones de SRF con valores entre 50 y 400 para condiciones de intenso e inmediato rock mass, Barton and Grimsstad (1994)

Fuente. Elaboración propia

La Figura siguiente, presenta los potenciales mecanismos de inestabilidad que se pueden encontrar presentes en Calizas alteradas, intrusivos alterados y mineral, donde la calidad geotécnica es de mala a regular (RMR89 de 20 a 50) y la condición de esfuerzos intermedio y altos. Bajo estas condiciones es posible encontrar mecanismos como derrumbe progresivo por mala calidad de macizo rocoso y deformación por altos esfuerzos en rocas dúctiles (Squeezing)

Figura 25. Potenciales mecanismos de inestabilidad a escala de galería en caliza alterada, intrusivo alterado y mineral

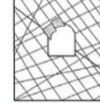
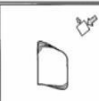
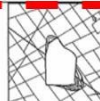
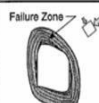
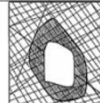
	ROCA COMPETENTE		ROCA DE MALA CALIDAD	
	Roca Masiva (RMR>75)	Moderadamente Fracturada (50<RMR<75)	Altamente Fracturada (30<RMR<50)	Roca muy mala o zonas de falla (RMR<30)
Bajo nivel de esfuerzos In-situ ($\sigma_1/\sigma_c < 0.15$)	 Roca masiva de comportamiento elástico SRF: 1.0	 Zona de fracturas aisladas, roca competente, formación de bloques o cuñas. SRF: 1.0	 Macizo rocoso fracturado, sensible a caída de bloques menores. SRF: 2.5-5.0	 Macizo de mala calidad sensible a derrumbe progresivo SRF: 5.0-7.5
Intermedio nivel de Esfuerzos In-situ (0.15< σ_1/σ_c <0.4)	 Fallamiento frágil adyacente a excavación SRF: 1.0-2.0	 Fallamiento frágil y/o movimiento de bloques. SRF: 1.0-2.0	 Fallamiento frágil y derrumbe progresivo SRF: 2.5-7.5	 Macizo de mala calidad con deformación y/o derrumbes inmediatos post-excavación SRF: 7.5-10.0
Alto nivel de Esfuerzos In-situ ($\sigma_1/\sigma_c > 0.4$)	 Fracturamiento frágil intenso en entorno de excavación. SRF: 5.0-7.5 (*)	 Fracturamiento frágil intenso en y activación de estructuras. SRF: 7.5-10.0 (*)	 Deformación elástico-plástica. SRF: 10-20 (*)	 Deformación elástico-plástica intensa y continua. SRF: 20-50 (*)

(*) Se tienen estimaciones de SRF con valores entre 50 y 400 para condiciones de intenso e inmediato rock Bursa, Barton and Grimstad (1994)

Fuente. Elaboración propia

La Figura siguiente, presenta los potenciales mecanismos de inestabilidad que se pueden encontrar presentes en Skarn, donde la calidad geotécnica es de mala a regular (RMR89 de 30 a 50) y la condición de esfuerzos intermedio y altos. Bajo estas condiciones es posible encontrar mecanismos como derrumbe progresivo por mala calidad de macizo rocoso, y deformación por altos esfuerzos en rocas dúctiles (Squeezing).

Figura 26. Potenciales mecanismos de inestabilidad a escala de galería en skarn

	ROCA COMPETENTE		ROCA DE MALA CALIDAD	
	Roca Masiva (RMR>75)	Moderadamente Fracturada (50<RMR<75)	Altamente Fracturada (30<RMR<50)	Roca muy mala o zonas de falla (RMR<30)
Bajo nivel de esfuerzos In-situ ($\sigma_1/\sigma_c < 0.15$)	 Roca masiva de comportamiento elástico SRF: 1.0	 Zona de fracturas aisladas, roca competente, formación de bloques o cuñas. SRF: 1.0	 Macizo rocoso fracturado, sensible a caída de bloques menores. SRF: 2.5-5.0	 Macizo de mala calidad sensible a derrumbe progresivo SRF: 5.0-7.5
Intermedio nivel de Esfuerzos In-situ (0.15< σ_1/σ_c <0.4)	 Fallamiento frágil adyacente a excavación SRF: 1.0-2.0	 Fallamiento frágil y/o movimiento de bloques SRF: 1.0-2.0	 Fallamiento frágil y derrumbe progresivo SRF: 2.5-7.5	 Macizo de mala calidad con deformaciones y/o derrumbes inmediatos post-excavación SRF: 7.5-10.0
Alto nivel de Esfuerzos In-situ ($\sigma_1/\sigma_c > 0.4$)	 Fracturamiento frágil intenso en entorno de excavación. SRF: 5.0-7.5 (*)	 Fracturamiento frágil intenso en y activación de estructuras. SRF: 7.5-10.0 (*)	 Deformación elástico-plástica. SRF: 10-20 (*)	 Deformación elástico-plástica intensa y continua SRF: 20-50 (*)

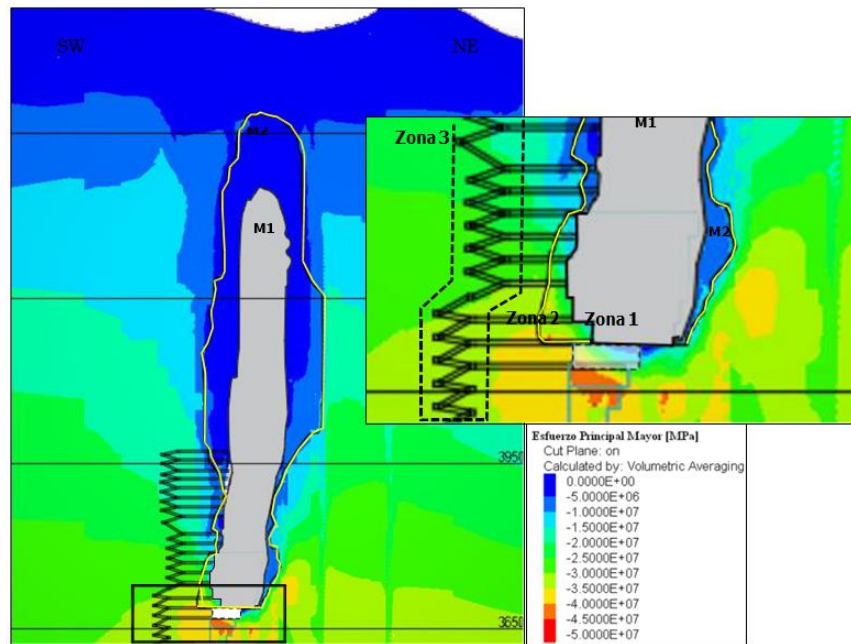
(*) Se tienen estimaciones de SRF con valores entre 50 y 400 para condiciones de intenso e inmediato rock Bursa, Barton and Grimstad (1994)

Fuente. Elaboración propia

1.2.12. Zonas de alerta por condiciones de esfuerzo – deformación

A partir de los resultados del modelamiento numérico, se determinaron las zonas que serán afectadas por mecanismos de esfuerzo – deformación. En la Figura 36, se muestra una vista en sección con los principales hallazgos del modelo numérico, destacando lo siguiente.

Figura 27. Zonas con sensibles a concentración y relajación de esfuerzos



Fuente. E-mining Technology

Zona 1

Zona con alta concentración de esfuerzos, con σ_1 superiores a 40 MPa que se ubica en la parte inferior de la envolvente M1. En este sector se desarrolla principalmente infraestructura de producción en macizo rocoso de regular a muy mala calidad geotécnica que se verán afectadas por el mecanismo de squeezing intenso.

Zona 2

Zona con concentración de esfuerzos moderada, con σ_1 superior a 35-40 MPa. Las labores que se desarrollan en este sector corresponden principalmente a galerías de transporte y accesos a los niveles de producción. Se tiene un macizo rocoso alterado de regular a mala calidad geotécnica y se espera que el principal mecanismo sea el derrumbe progresivo y squeezing moderado.

Zona 3

Zona que se extiende más allá de la envolvente de M2 donde existe un menor grado de desconfinamiento del macizo rocoso con σ_1 entre 15 y 35 MPa. Las labores

que se desarrollan en esta zona son las rampas principales que dan acceso a los diferentes niveles de la profundización con calidades de roca entre regular a buena calidad geotécnica. Se espera que los potenciales mecanismos estén asociados a un control estructural con bloques sensibles a caer, y fallamiento frágil.

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema general.

¿Es posible determinar el desplazamiento o desprendimiento del macizo rocoso del sill pillar para el control de minado del cuerpo Cuerpo Pamela en la UM Yauricocha?

1.3.2. Problemas específicos

¿Cómo afecta el comportamiento geomecánico del macizo rocoso del sill pillar al desplazamiento o desprendimiento del mismo, y de qué manera puede ser evaluado para optimizar el control del minado del Cuerpo Pamela en la UM Yauricocha?

1.4. Formulación de objetivos

1.4.1. Objetivos generales

Determinar el comportamiento del macizo rocoso del sill pillar en el Cuerpo Pamela de la UM Yauricocha, con el fin de evaluar el riesgo de desplazamiento o desprendimiento y proponer estrategias para el control seguro del minado.

1.4.2. Objetivos específicos

Monitorear los desplazamientos o movimientos del macizo mediante instrumentación geotécnica, geocentinelas.

1.5. Justificación de la investigación

La explotación minera subterránea en cuerpos mineralizados como el Cuerpo Pamela de la UM Yauricocha requiere un entendimiento profundo del comportamiento del macizo rocoso, especialmente en zonas críticas como los sill pillar, que cumplen un rol estructural clave al sostener niveles superiores durante las operaciones. La falta de un análisis detallado de la estabilidad de estos pilares puede generar riesgos significativos, como desprendimientos, colapsos o interrupciones en la continuidad operativa, afectando tanto la seguridad del personal como al proceso.

Esta investigación se justifica por la necesidad de prevenir eventos geomecánicos no controlados que comprometan la integridad del macizo rocoso y la eficiencia del minado. Mediante la caracterización geotécnica, la evaluación de estabilidad y el monitoreo de desplazamientos, se busca obtener información técnica que permita optimizar el diseño y el control del minado. Además, los resultados permitirán tomar decisiones adecuadas, reducir riesgos laborales.

Por lo tanto, este estudio no solo responde a una necesidad operativa y de seguridad, sino que también aporta al conocimiento técnico de la ingeniería en la prevención de riesgos de rocas en contextos complejos como el de Yauricocha.

1.6. Limitaciones de la investigación

El presente estudio se enfoca en una metodología de monitoreo poco convencional y escasamente implementada en el contexto de la minería subterránea. La técnica central, el sistema geocentinela, que opera mediante la detección de cortes en un cable de bajo voltaje, es un instrumento electrónico de poco uso en el sector. Esta falta de adopción se evidencia en la casi nula existencia de información o

investigaciones académicas previas que exploren su aplicación específica para el monitoreo de Sill Pillar.

En este contexto, la presente investigación adquiere un valor significativo, ya que su objetivo principal es llenar este vacío de conocimiento. Al estudiar y validar la efectividad del sistema geocentinel, el trabajo busca sentar las bases para prevenir accidentes causados por fallas estructurales inesperadas en el macizo rocoso, contribuyendo así a mejorar los estándares de seguridad en las operaciones mineras subterráneas.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudio

En mina Yauricocha no se tienen antecedentes de uso del sistema de monitoreo con Geocentinelas; ya que son sistemas de instrumentación geotécnica que se han implementado recientemente en esta Unidad. Algunas tesis que hablan sobre sistemas de monitoreo geomecánico son.

Meza, R (2024). En su investigación de tesis titulado “Implementación del sistema de monitoreo geotécnico para evaluar el comportamiento de la subsidencia en el método de explotación Sublevel Caving en la Unidad Minera Yauricocha 2024” evaluó cómo la implementación de un sistema de monitoreo geotécnico permite evaluar el comportamiento de subsidencia en el método de explotación Sublevel Caving en la unidad minera Yauricocha. Se utilizaron inclinómetros para medir desplazamientos en múltiples direcciones, el Robot Leica para mediciones precisas de subsidencia superficial y tecnología microsísmica para detectar actividad sísmica asociada con la explotación subterránea. Los resultados destacaron un máximo acumulado de

subsistencia de 81.01 cm desde 2017, evidenciando la importancia del monitoreo geotécnico para comprender y mitigar los riesgos asociados con la explotación minera.

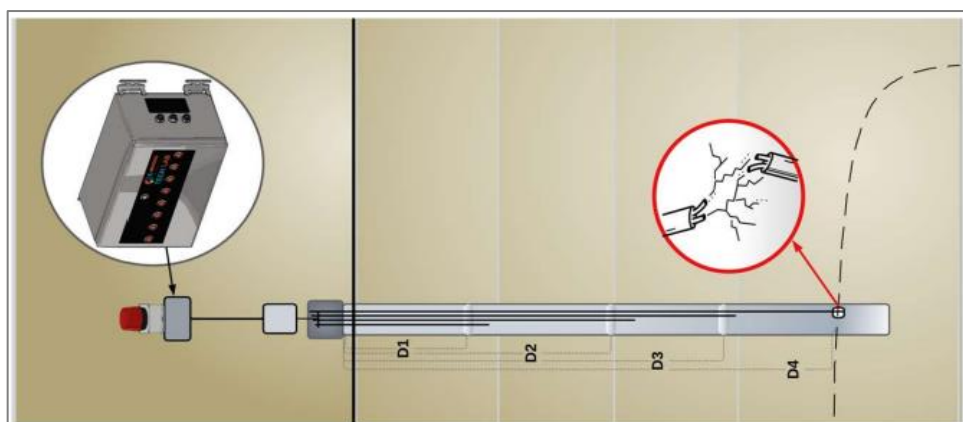
Quispe, J. (2023) en su tesis titulada “Análisis geomecánico para determinar la estabilidad del pique central y pique mascota en la mina Yauricocha, 2022” realizó un análisis geomecánico para determinar la estabilidad del pique central y pique mascota en la mina Yauricocha. Se emplearon inclinómetros para medir deformaciones en las excavaciones, encontrando desplazamientos de 5.21 cm y 7.21 cm en 599 días para los piques mascota y central, respectivamente. El estudio concluyó que la aplicación del análisis geomecánico es fundamental para garantizar la estabilidad de las estructuras subterráneas.

2.2. Bases teóricas – científicas

2.2.1. Geocentinela o Sistema de monitoreo por corte.

Sistema de monitoreo por corte nos permite monitorear el colapso o evolución del sill pillar por propagación o ampliación de la subsidencia los cuales afectan la seguridad de las personas, equipos y la estabilidad de la zona de minado.

Figura 28. Diagrama del cableado interno a colocarse dentro de los taladros diamantinos del sistema geocentinela.

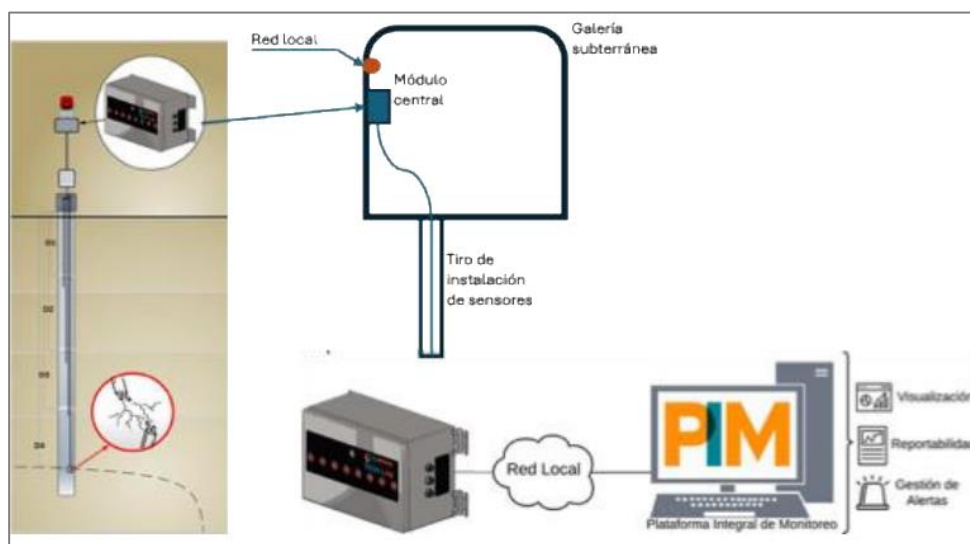


Fuente. E-mining Technology

Este sistema facilita el monitoreo del hundimiento localizado (colapso del sill pillar), lo que desencadena un aumento en la magnitud y expansión del cono de subsidencia. Como consecuencia, se incrementa la inestabilidad en las labores mineras circundantes, afectando su integridad estructural. Dichos fenómenos no solo elevan la altura del caving (proceso de hundimiento), sino que también promueven la propagación de tensiones geomecánicas, manifestadas mediante eventos microsísmicos en zonas aledañas. Estos disturbios comprometen significativamente el desarrollo normal de las operaciones de explotación, generando riesgos operacionales y retrasos en la producción.

Además, la interacción entre el colapso del sill pillar y la subsidencia puede exacerbar las deformaciones en el macizo rocoso, requiriendo intervenciones correctivas para mitigar impactos a largo plazo. La detección temprana de estos patrones mediante el sistema de monitoreo resulta clave para optimizar la planificación minera y garantizar la seguridad para un desarrollo normal de nuestras operaciones.

Figura 29. Diagrama del sistema de instrumentación por corte o Geocentinela.



Fuente. E-mining Technology

2.2.2. Teoría del Elipsoide

El Sub Level Caving es un método de minería masiva donde la extracción del mineral depende principalmente de la gravedad. Al remover una capa horizontal delgada (llamada "undercut") en el nivel de extracción, se elimina el soporte vertical de la columna de mineral, lo que provoca su colapso. A medida que se extrae el mineral fragmentado, el material superior continúa colapsando por gravedad.

Uno de los aspectos clave para el éxito es el control de la dilución durante la extracción. El flujo por gravedad del mineral fragmentado determina la cantidad de material valioso recuperado y la dilución con material estéril, lo que afecta directamente la economía de la operación. Además, el flujo también dicta el espaciamiento entre los puntos de extracción, lo que influye en los costos de desarrollo de la mina.

A pesar de los avances en la investigación, aún no se pueden realizar simulaciones 3D confiables para predecir la recuperación y dilución en condiciones específicas. Se han desarrollado modelos matemáticos, pero carecen de validación debido a la falta de datos confiables.

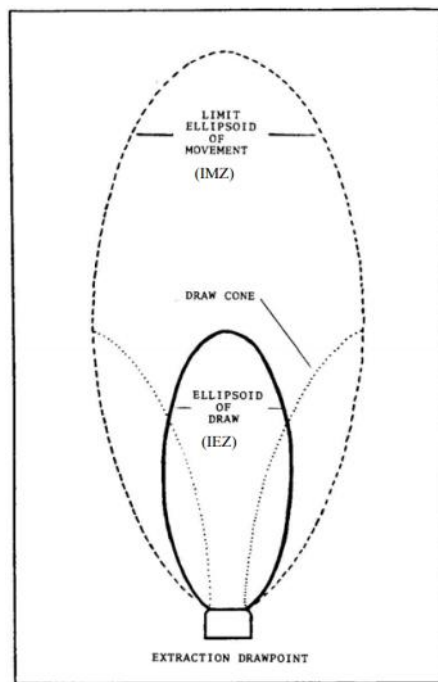
En el estudio del flujo de material fragmentado en minas de Block Caving, existen dos conceptos principales.

Primero, Zona de Extracción Aislada (IEZ). Contorno que rodea la ubicación original del material extraído en un punto de extracción en un momento dado. Esto se ha definido en varios lugares como el elipsoide de movimiento, el elipsoide de extracción, el cuerpo de extracción, el área de extracción, la envolvente de extracción o la zona de extracción. El autor conservará el término original tal como lo utiliza cada autor en la revisión de la literatura. Sin embargo, para su propio trabajo, el autor

utilizará el término Zona de Extracción Aislada (IEZ por sus siglas en inglés, Esolated Extraction Zone).

Segundo, Zona de Movimiento Aislado (IMZ). Contorno que rodea la ubicación original del material que se ha movido pero no necesariamente ha sido extraído.

Figura 30. *Envoltentes de dibujo de dibujo y movimiento (Just 1981)*



Fuente. Just 1981

El tercer concepto es la interacción. La interacción entre dos o más zonas de extracción o movimiento de puntos de extracción adyacentes se define como cuando estas zonas se expanden desde su tamaño aislado bajo el proceso de extracción, como resultado de la extracción de puntos de extracción vecinos. Cuando estas zonas no se tocan, se definen como aisladas.

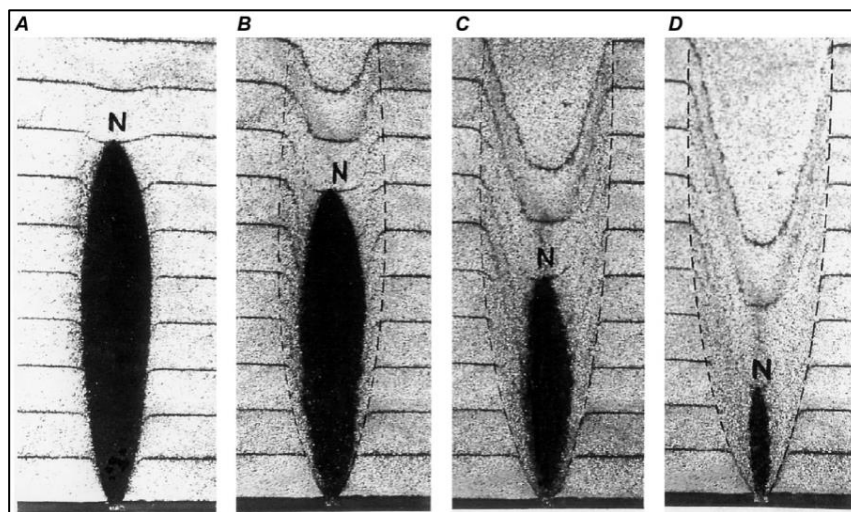
Modelos de Arena

Kvapil (1965, 1992) parece ser la primera persona en intentar un enfoque cuantitativo para el flujo gravitacional de roca fragmentada. Su primer trabajo tuvo

como objetivo proporcionar relaciones matemáticas relacionadas con el flujo de material granular en tolvas y contenedores. Poco después con Janelid (Janelid y Kvapil 1966) extendió este trabajo a la idealización del flujo gravitacional para minas de mineral de hierro a gran escala en Suecia que usaban Sublevel Caving como su método minero. Aunque inicialmente solo usando modelos 2D a pequeña escala, su trabajo demostró ser significativo y fue usado como herramienta de diseño durante muchos años.

Kvapil construyó un simple modelo vertical de vidrio (contenedor) con relleno de arena blanca y negra en capas. El modelo tenía una ranura en su base. Cuando se abría la ranura, la arena fluía en fases como se muestra en la Figura 31. Puede verse que solo una cierta parte de todo el material en el contenedor comenzaba a moverse cuando se abría la ranura.

Figura 31. Modelo típico de arena que muestra la elipse de tracción.



Fuente. Basado en observaciones en este modelo, se postuló que el material que había sido descargado después de un período de tiempo dado se originaba dentro de una zona aproximadamente elipsoidal que Janelid y Kvapil (1966) llamaron el elipsoide de

movimiento, extracción o extracción. Junto a él, hay otra zona que llamaron el elipsoide límite o de aflojamiento. Kvapil (1965,1992)

El material entre el elipsoide de movimiento y un elipsoide límite correspondiente se aflojaba y desplazaba pero no alcanzaba el punto de descarga (la ranura). El material fuera del elipsoide límite permanecía estacionario. A medida que procedía la extracción, una línea originalmente horizontal dibujada a través del material se desviaba hacia abajo en forma de un cono invertido. La forma de este cono de extracción indicaba cómo los mayores desplazamientos ocurren en un canal de flujo central. Esta teoría se muestra en la Figura 32 .

La forma de un elipsoide de movimiento dado puede describirse por su excentricidad (ε).

$$\varepsilon = \frac{1}{a_N} (a_N^2 - b_N^2)^{1/2}$$

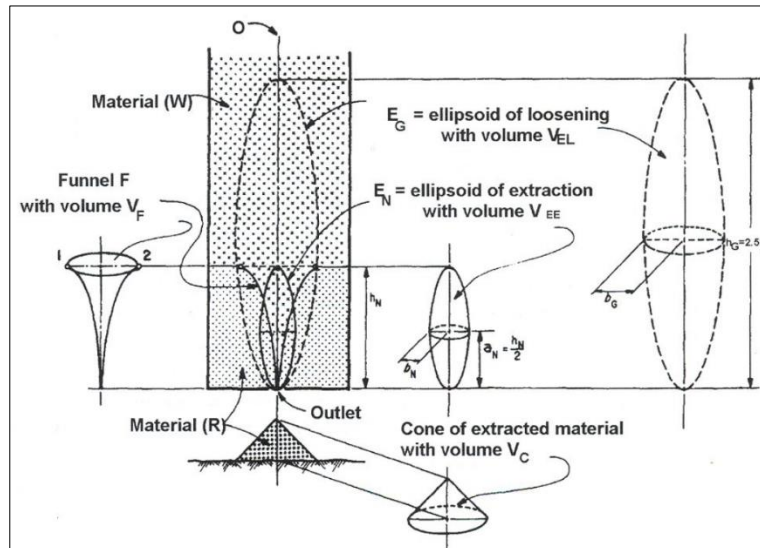
Donde.

a_N . Semi eje Mayor

b_N . Semi eje menor

La forma y tamaño del elipsoide está determinada por el tamaño de partícula del material que fluye con la misma abertura de descarga y la altura a la que se extrae el material. Se encontró que las partículas pequeñas tenían mayor excentricidad que las más grandes, y por lo tanto tiene una forma más delgada y alargada. La excentricidad aumenta con mayor altura de extracción.

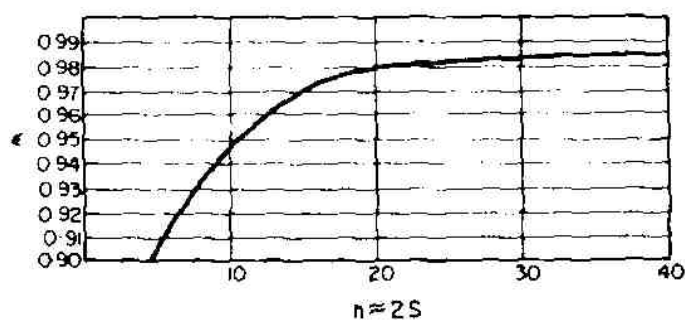
Figura 32. La teoría del elipsoide



Fuente. (Kvapil 1992)

Se asumió que la sección transversal horizontal del elipsoide es circular. En la práctica, ϵ varía entre 0.90 y 0.98 dependiendo de la altura de extracción como se muestra en la Figura 4. Se considera que el rango de 0.92 a 0.96 es el más común, al menos para minas SLC.

Figura 33. Valores de excentricidad



Fuente. (Janelid y Kvapil 1966).

Con las mayores alturas de extracción en Block Caving, pueden ser más apropiadas excentricidades mayores que 0.96, incluso aunque la fragmentación tiende

a ser más gruesa que en minas SLC. Dado que a_N es la mitad de la altura de extracción, b_N entonces podría calcularse utilizando la ecuación anterior. Janelid y Kvapil desarrollaron así los criterios de diseño de minas Sublevel Caving basados en este concepto de elipsoide, como la ubicación de las galerías de subnive y el ancho óptimo de la galería del punto de extracción en relación con el tamaño de fragmentación del mineral fragmentado.

Hay otro método para calcular b_N (Janelid y Kvapil 1966). Si se conoce.

$$b_N = \sqrt{\frac{V_N}{2.094 * h_N}}$$

b_N . Semi-ancho del elipsoide de desprendimiento.

V_N . Si se conoce el volumen del material extraído,

h_N . Altura del elipsoide,

Con respecto al elipsoide límite, Janelid y Kvapil proporcionaron las siguientes relaciones. Se asumió que el elipsoide límite tiene la misma forma, por lo tanto excentricidad, que el elipsoide de movimiento. El material entre los dos elipsoides se aflojará y desplazará pero no llegará al punto de descarga. Este aflojamiento se describe mediante el factor de aflojamiento α como

$$\alpha = \frac{E_G}{E_N}$$

donde E_G es el volumen del elipsoide límite y E_N es el volumen del elipsoide de movimiento. El valor de α varía de 1.066 a 1.100. Janelid y Kvapil afirmaron que en la mayoría de los materiales granulares, α tiende hacia la cifra inferior de 1.066. Si aplicamos esta cifra a la ecuación anterior, obtenemos.

$$E_G = 15E_N$$

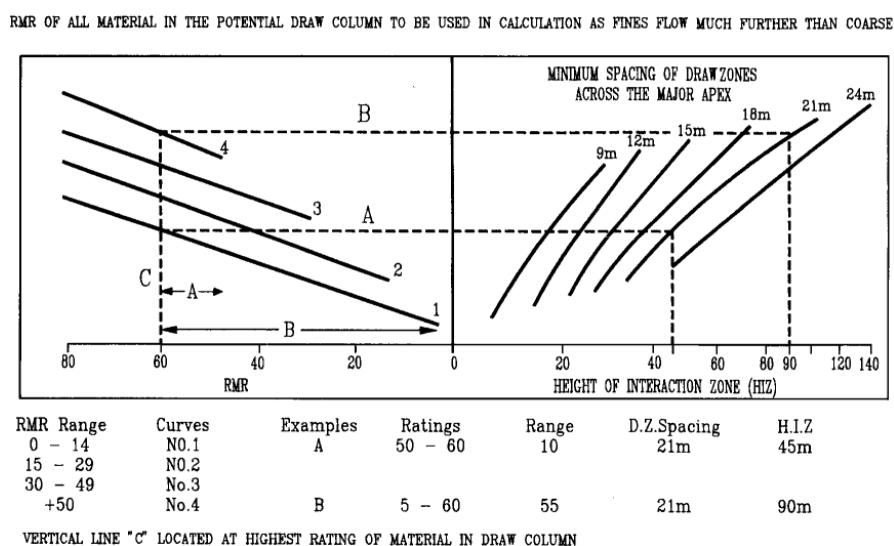
Esto significa que el volumen del elipsoide límite es aproximadamente 15 veces mayor que el volumen del elipsoide de movimiento. Por lo tanto, la altura del elipsoide límite h_G podría como

$$h_G = 2.5h_N$$

La teoría del elipsoide de Kvapil desde entonces ha sido ampliamente aceptada como una guía de diseño en minas Sublevel Caving en todo el mundo. Sin embargo, algunos modeladores de arena posteriores encontraron que esta teoría no modela el flujo con precisión (Heslop 1983; Heslop y Laubscher 1981; Laubscher 1994, 2000; Marano 1980; McCormick 1968). McCormick encontró que la forma del cuerpo de movimiento se asemeja a un cilindro con forma de cono en la base. Marano, Heslop y Laubscher (1980, 1981, 1983, 1994, 2000) también observaron algo similar en su modelo de arena. Su modelo se discutirá en detalle más adelante en esta subsección.

Laubscher (1994) nos proporciona un modelo de cálculo empírico de acuerdo al RMR, **Figura 34**.

Figura 34. RMR versus Altura de Interacción



Fuente. D.H. Laubscher (1994)

Espaciado entre zonas de extracción basado en la recuperación

El concepto de espaciado de puntos de extracción basado en la recuperación que se describe en este documento se basa en el concepto de interacción de zonas de extracción adyacentes. En este concepto, el el flujo másico sólo se produce cuando las zonas de flujo adyacentes están espaciadas de forma que interactúen a una altura determinada. Este modelo de flujo para roca excavada se basa en los resultados de un gran modelo físico en el que se estudió ampliamente la interacción utilizando un gran modelo de grava (Trueman et al., 2008). Como se muestra en la **Figura 35**, cuando se tira de un punto de extracción en su base, se desarrolla una zona de flujo que podría caracterizarse, entre otras variables, por el ángulo de flujo. Este ángulo puede calcularse a partir del ángulo de fricción de la roca excavada. La altura de interacción puede calcularse a partir de las propiedades de flujo de la roca cavada y la separación como.

$$HIZ = \left[\frac{d_p - w_p}{2} \right] \tan (\alpha)$$

$$\alpha = 45 + \frac{\phi}{2}$$

Donde.

HIZ. Altura máxima a la que interceptan las zonas de flujo desde el techo de la galería del nivel de producción en metros.

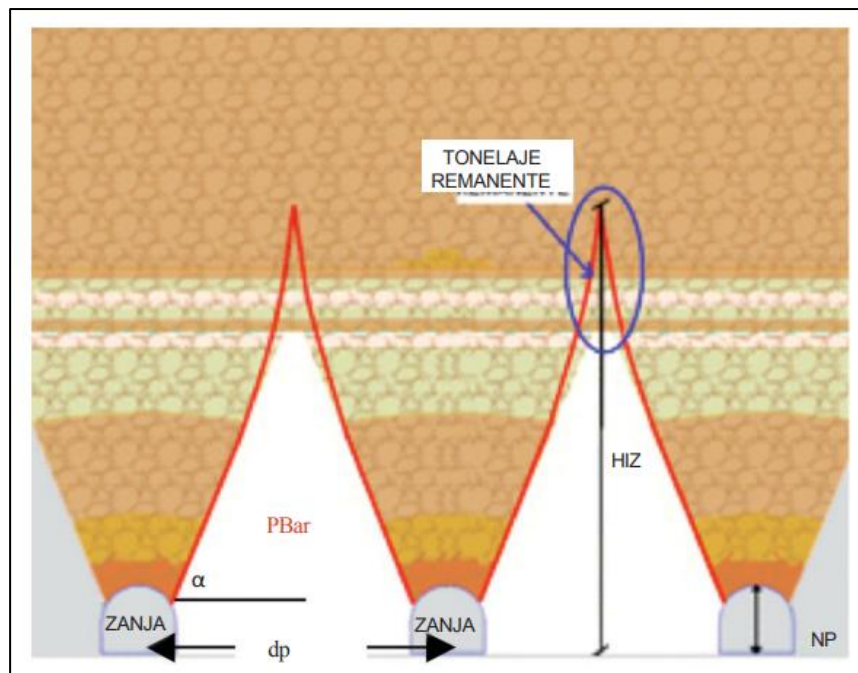
wp. Anchura de la galería de extracción en metros.

dp. Distancia entre puntos de extracción adyacentes (distancia entre campanas de extracción, producción o puntos de extracción).

α . Ángulo de flujo.

ϕ . Ángulo de fricción de la roca excavada.

Figura 35. Dibujo en base a al block caving



Fuente. R.L castro, R. Vargas y F, de la Huerta, 2012. Determination of Drawpoint spacing in panel caving. A case study an the El Teniente Mine.

2.2.3. Caracterización geomecánica del macizo rocoso

El macizo rocoso fue caracterizado a partir de la información de planos geomecánicos y bases de datos con mapeo geotécnico de sondajes y ensayos de laboratorio. La definición de las Unidades Geotécnicas (UGT) se realizó mediante el análisis de los siguientes elementos.

- Mapeo geomecánico de plantas.
- Rock Mass Rating, Bieniawski 1989 (RMRB89)
- Geological Strength Index (GSI)
- Rock Quality Designation (RQD)
- Propiedades de Roca Intacta (Densidad, Resistencia a la Compresión Simple, m_i)

2.2.4. Definición de unidades geotécnicas

A partir de la integración del modelo litológico con la información geológica-geotécnica de sondajes y celdas en superficie, se definieron siete unidades geotécnicas.

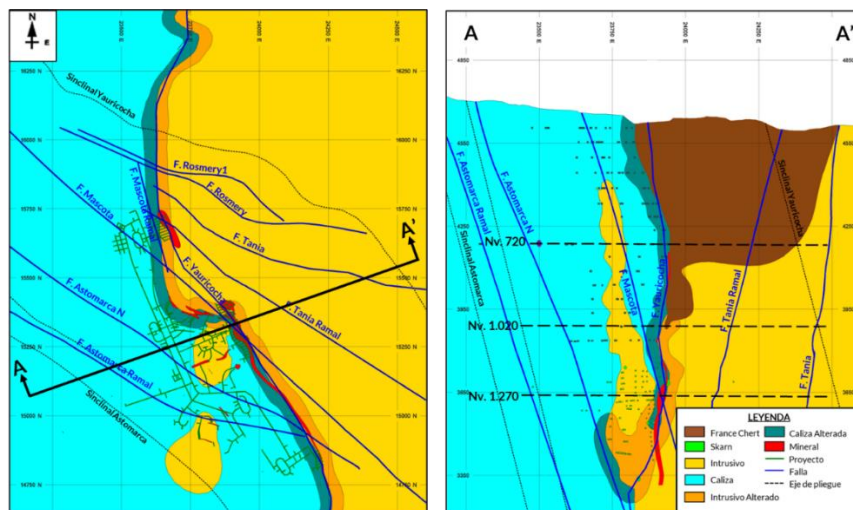
- UGT Intrusivo. Corresponden a los sill, stock y diques basálticos, granodioríticos y monzoníticos que intruyen a las calizas. Presenta un índice RMRB89 medio de 55 (calidad regular), y un rango entre 42 y 67. Además, la resistencia de roca intacta (IRS) es R4 a R5.
- UGT Caliza. Comprende las calizas de la Formación Jumasha con escasa a nula alteración. Su RMRB89 promedio es 51 (calidad regular), y varía entre 39 y 62, mientras que la resistencia de roca intacta es R3 a R4.
- UGT Caliza Alterada. Incluye a las calizas de la Formación Jumasha, con procesos de oxidación, recristalización o metamorfismo de contacto, cuyo producto son rocas como mármol y córneas. Su RMRB89 promedio es 41 (calidad regular), y varía entre 28 y 53, en tanto que la resistencia de roca intacta es R3 a R4.
- UGT Intrusivo Alterado. Agrupa a las rocas intrusivas con alteraciones tales como argilización u oxidación, ubicadas principalmente en el contacto con las calizas. El RMRB89 medio es 38 (calidad mala), oscilando entre 25 y 48. La resistencia de roca intacta es del rango R3-R5.
- UGT Mineral. Corresponde a los cuerpos mineralizados que se distribuyen a lo largo del yacimiento (polimetálico, óxidos y cobre). El promedio de RMRB89 es 32 (calidad mala), con un rango entre 23 y 43. Además, la resistencia de roca intacta es R3-R4.
- UGT France Chert. Incluye las lutitas silicificadas de la Formación Celendín, denominadas localmente France Chert. El promedio de RMRB89 es 50 (calidad

regular), y varía entre 38 y 60. La resistencia de roca intacta, por otro lado, oscila entre R2 y R4.

- UGT Skarn. Esta unidad corresponde a las rocas con alteración tipo skarn, ubicadas principalmente entre el contacto de calizas e intrusivo. El medio es 43 (calidad regular), con un rango de 34 a 53, mientras que la resistencia de roca intacta es R4 a R5.

En la Figura 31, se muestra una planta y sección con las unidades geotécnicas presentes en la mina. En la Tabla 5, se resumen los valores mínimos, medios y máximos de los índices geotécnicos de cada UGT definida. Los valores mínimos y máximos de cada índice se estimaron utilizando el percentil 10% para los mínimos y el percentil 90% para los máximos de los datos.

Figura 36. Planta del nivel 1.270, piso 00, y sección con unidades geotécnicas.



Fuente. Área de geomecánica

Tabla 5. Unidades geotécnicas e índices de calidad geotécnica

Unidad Geotécnica	RMR89 (Rock Mass Rating)			GSI (Geological Strength Index)			RQD (%) (Rock Quality Designation)		
	Mín.	Media	Máx.	Mín.	Media	Máx.	Mín.	Media	Máx.
Intrusivo	42	55	67	37	50	62	21	60	91
Caliza	39	51	62	34	46	57	39	51	62
Caliza Alterada	28	41	53	23	36	48	0	28	66
Intrusivo Alterado	25	38	48	20	33	43	0	23	53
Mineral	23	32	43	18	27	38	0	17	50
France Chert	38	50	60	33	45	55	13	46	88
Skarn	34	43	53	29	38	48	13	31	45

Fuente. Área de geomecánica

2.2.5. Propiedades físicas y mecánicas de la roca intacta

Las propiedades físicas y resistentes de roca intacta fueron estimadas a partir de bases de datos de análisis de laboratorio, que comprenden ensayos uniaxiales, triaxiales, tracción indirecta y de constantes elásticas, definiendo valores mínimos, medios y máximos a partir de las envolventes formadas en las gráficas de esfuerzos. En Tabla 6, se muestra un resumen de estas propiedades para cada unidad geotécnica.

Tabla 6. Unidades geotécnicas y propiedades de roca intacta.

Unidad Geotécnica	Densidad (kN/m ³)	σ_{ci} (MPa)			μ_i			Propiedades elásticas	
	Media	Mín	Media	Máx	Mín	Media	Máx	Ei (GPa)	ν
Intrusivo	26,6	75	119	170	13	15	17	20,6	0,21
Caliza	26,6	36	53	78	9,0	10,9	12,5	16,9	0,25
Caliza Alterada	26,3	28	46	72	10	11,6	13	22,9	0,19
Intrusivo Alterado	24,8	41	68	111	13,5	14,7	16,5	20,6	0,19
Mineral	36,5	26	40	61	15	16,6	18	2,5	0,36
France Chert	26,3*	23	38	60	16,5	19,2	21	22,9*	0,19*
Skarn	28,1	65	89	110	13	15,4	18	23,3	0,36

*Estimación a partir de propiedades de UGT Caliza Alterada, basado en similitud de comportamiento del macizo rocoso

Fuente. Área de geomecánica

2.2.6. Propiedades resistentes de sistemas de discontinuidades

Las propiedades para las discontinuidades del proyecto fueron estimadas mediante la integración de datos obtenidos de ensayos de corte directo en discontinuidades menores, caracterización de condición de discontinuidades o joint condition descrita en celdas geotécnicas, y experiencia del consultor en proyectos desarrollados en depósitos con similares características geológicas- geotécnicas. En la Tabla 07, se muestra un resumen de propiedades resistentes para los distintos tipos de discontinuidades. En el caso de las discontinuidades menores, se detallan valores para cada unidad geotécnica.

Tabla 7. Unidades geotécnicas y propiedades de roca intacta.

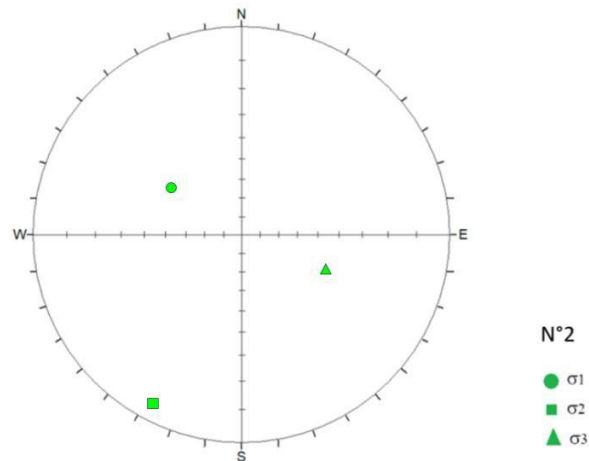
Tipo de discontinuidad	UGT	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción (°)
Menor	Caliza	120	37
Intermedia	Intrusivo	119	34
	Caliza Alterada	57	27
	Intrusivo Alterado	34	21
	Mineral	21	14
	France Chert	119	34
	Skarn	119	34
	Todas	80	26
Mayor	Todas	20	15

Fuente. Área de geomecánica

2.2.7. Modelo de campo de esfuerzo

A partir de los resultados de mediciones de esfuerzos mediante overcoring (Geosinergia, 2021), se consideran como esfuerzos in situ los medidos en el ensayo 2 realizado en Mina Cachi Cachi. En la Figura 32, se muestran las orientaciones de los esfuerzos principales, y en la Tabla 8, se resumen los resultados del ensayo 2. En general, se observa que el esfuerzo principal mayor es subvertical en sentido NW-SE mientras que el menor es también subvertical con orientación EW, lo cual es concordante con el contexto geológico - estructural y la génesis del yacimiento.

Figura 37. Estereograma del tensor de esfuerzo de mina Yauricocha



Fuente. Área de geomecánica

Tabla 8. Tensor de esfuerzos de mina yauricocha

Ensayo	σ_1 (MPa)	Az1 (°)	I1 (°)	σ_2 (MPa)	Az2 (°)	I2 (°)	σ_3 (MPa)	Az3 (°)	I3 (°)
2	22,82	304,40	46,50	9,86	208,70	5,30	3,07	113,80	43,00

Fuente. Área de geomecánica

2.2.8. Aspectos geológicos-geotécnicos relevantes

Los aspectos geológicos geotécnicos relevantes corresponden a elementos geológicos y/o geotécnicos/geomecánicos que tienen el potencial de generar inestabilidades en el diseño subterráneo, por lo cual es necesario realizar un estricto seguimiento de su comportamiento durante el avance de la explotación del yacimiento. Los elementos más relevantes para el proyecto Yauricocha son.

- **Zona de contacto caliza-intrusivo.** el contacto caliza-intrusivo se encuentra en la traza de la falla Yauricocha, caracterizada por presentar un espesor medio de halo de fracturamiento cercano a 14 m, además de una franja de alteración en calizas e intrusivo de 35 a 70 m de potencia perpendicular al contacto, por lo que las galerías y ventanas que se emplacen en esta zona pueden ver afectada su estabilidad.

- **Fallas mayores.** las fallas mayores que se ubican en el sector del proyecto de profundización (Yauricocha, Mascota, Astomarca Norte, Tania y Rosmery) presentan halos de fracturamiento con potencias variables a lo largo de sus trazas, pudiendo llegar hasta 15 m de espesor, por lo que su intersección con infraestructura del minado puede generar inestabilidades en galerías y ventanas. Además, estas estructuras pueden conducir volúmenes de agua desde niveles superiores, que pueden contribuir a la ocurrencia de soplos.
- **UGT Mineral e Intrusivo Alterado.** De acuerdo con la caracterización geotécnica, las zonas mineralizadas y/o en presencia de intrusivo alterado, presentan una calidad de roca mala, pudiendo ocurrir inestabilidades en la infraestructura subterránea emplazada en estas UGT durante el desarrollo del proyecto.
- **Conductos principales de tránsito de aguas.** Estos conductos funcionan como vías preferenciales para el flujo de aguas superficiales y subterráneas, facilitando su infiltración hacia los niveles más profundos de la mina. En su mayoría, están asociados a fallas mayores, lineamientos definidos por discontinuidades intermedias y leyes de metales, así como a las cavidades generadas por el minado, que a su vez favorecen la acumulación de agua. La combinación de una columna de agua en las cavidades y el material tronado remanente constituye un riesgo potencial de soplos, especialmente si el proyecto de profundización se desarrolla por debajo de dichas zonas.
- **Subsidencia.** Este mecanismo asociado al tipo de minería presente, se caracteriza por la presencia de 3 tipos de materiales (M1, M2 Y M3), los cuales se diferencian en el grado de fracturamiento y disposición espacial, pudiendo afectar la infraestructura minera a medida que se realiza la profundización de la mina.

2.3. Definición de términos básicos

Macizo Rocoso

Es un volumen de roca natural que puede estar intacto o fracturado, con o sin presencia de discontinuidades (como fallas, diaclasas o fisuras). Su comportamiento mecánico depende tanto de las propiedades de la roca intacta como de las características de las discontinuidades presentes.

Roca intacta

Parte del macizo rocoso que no presenta fracturas o discontinuidades visibles. Sus propiedades se determinan mediante ensayos de laboratorio.

Discontinuidades

Planos de debilidad dentro del macizo rocoso, como fracturas, diaclasas, fallas, foliaciones, vetas y contactos litológicos.

Esfuerzo in situ (In situ stress)

Estado natural de tensiones presentes en el macizo rocoso antes de cualquier excavación. Influye en la propagación de fracturas y el comportamiento post-voladura.

Factor de seguridad (FS)

Relación entre la resistencia de un talud o estructura subterránea y las fuerzas que actúan sobre ella. $FS < 1$ indica inestabilidad.

Subsidencia

Descenso progresivo del terreno en superficie debido al colapso interno del macizo rocoso. Requiere monitoreo para prevenir daños en infraestructura.

Sub Level Caving (SLC)

Método de minería subterránea de hundimiento en el que se extrae el mineral en niveles horizontales (subniveles) desde arriba hacia abajo, permitiendo que el material estéril superior se hunda gradualmente.

Fragmentación del macizo

Tamaño de los bloques de roca tras la voladura. Depende de la geología, diseño de malla de perforación, y control de explosivos.

Zona de fracturamiento inducido

Región donde se generan nuevas fracturas por efecto del hundimiento y la redistribución de esfuerzos. Afecta la estabilidad y ventilación.

Propagación de la caverna

Movimiento ascendente del hundimiento desde el punto de extracción hacia los niveles superiores. Su control depende de la competencia del macizo.

Fracturamiento natural

Presencia de planos de debilidad naturales como diaclasas, vetas o fallas. Afecta la direccionalidad del colapso y la estabilidad local.

Colapso progresivo

Mecanismo donde el hundimiento se desarrolla gradualmente, siguiendo la zona de menor resistencia estructural.

Monitoreo geomecánico

Uso de herramientas como. extensómetros, geocentinelas, monitoreo con robot leica, telmeter, cables TDR, sistema microsismico. para evaluar el comportamiento del macizo durante el hundimiento.

Geocentinela. Destinado al monitoreo de estabilidad del macizo rocoso en un pilar en donde no se puede realizar medición directa.

2.4. Formulación de Hipótesis

2.4.1. Hipótesis General

El macizo rocoso del sill pillar presenta condiciones geomecánicas que permiten predecir su comportamiento mediante modelamiento numérico y monitoreo in situ, lo que facilita implementar medidas efectivas de control del minado del Cuerpo Pamela en la UM Yauricocha.

2.4.2. Hipótesis Especificas

- Si se caracterizan adecuadamente las propiedades geotécnicas del macizo rocoso del sill pillar, entonces es posible identificar zonas con mayor probabilidad de desplazamiento o desprendimiento mediante análisis de estabilidad.
- Si se realiza un monitoreo continuo del comportamiento del sill pillar, entonces se podrá anticipar fallas estructurales y ajustar las estrategias de explotación para mejorar la seguridad y eficiencia operativa.

2.5. Identificación de variables

2.5.1. Variable independiente

- X = Implementación del Sistema Geocentinela.

2.5.2. Variable dependiente

- Y = Monitoreo del Sill Pillar del Cuerpo Pamela

2.6. Definición Operacional de variable e indicadores

Tabla 9. Variable e indicadores de operación

Tipo de variable	Nombre de variable	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores
Variable independiente	X = Implementación del Sistema Geocentinela.	La variable busca prevenir riesgos geomecánicos, como desprendimientos de roca, hundimientos o colapsos, mediante la integración de sensores, software especializado y protocolos de alerta temprana	X1= Monitoreo de las variaciones de longitud del cable del geocentinela instalado en el Cuerpo Pamela de la Unidad Minera Yauricocha. X2= Tiempo de operación del sistema de monitoreo Geocentinela implementado en el Cuerpo Pamela Esperanza, Mina Yauricocha	X1 = Longitud del Cable Geocentinela (en metros). X2 = Tiempo de monitoreo hasta la variación de la longitud del cable (horas, días).
Variable Dependiente	Y = Monitoreo del Sill Pillar del Cuerpo Pamela	La variable integra un sistema de alerta temprana por anomalías en el geocentinela, complementado con evaluación de esfuerzos y estabilidad del Sill Pillar a través de caracterización rocosa y modelos geomecánicos.	Y1= Implementación de protocolos de actuación en respuesta a las desviaciones detectadas en el cable sensor del Geocentinela. Y1= Esfuerzos generados en el macizo rocoso como consecuencia del método de explotación minera empleado.	Y1 = Rangos de criticidad (adimensional). Y2 = Esfuerzos inducidos (Mpa).

Fuente. Elaboración propia.

CAPITULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de investigación

Investigación aplicada. este tipo de investigación se centra en la utilización de los conocimientos y saberes para la resolución práctica de problemas, en este sentido aplicar los conocimientos de geomecánica, porque permite validar el conocimiento técnico y práctico sobre la aplicación de la implementación de un Sistema de monitoreo en un pilar.

3.2. Nivel de investigación

Corresponde a un nivel aplicado, debido a que está orientado a la gestión y control de riesgos operacionales, así como a la identificación y solución de problemas asociados a las condiciones geomecánicas y operativas de la actividad minera. Asimismo, incorpora un componente explicativo al analizar las causas, mecanismos de ocurrencia y relaciones entre las variables involucradas, con el propósito de establecer

criterios técnicos que contribuyan a la toma de decisiones y a la mejora de las condiciones de seguridad y estabilidad de las excavaciones.

3.3. Método de investigación

3.3.1. Método descriptivo

Se ha utilizado para describir y especificar todos los aspectos, contextos y situaciones relacionados a la implementación de un Sistema de monitoreo en un pilar del cuerpo Pamela en la Unidad Minera Yauricocha.

3.3.2. Método inductivo

Se ha aplicado para inferir la información recolectada, que parte de lo particular a lo general, es decir, de casos específicos para llegar a una conclusión. En este contexto se ha determinado los resultados a la implementación de un Sistema de monitoreo en un pilar del cuerpo Pamela en la Unidad Minera Yauricocha

3.4. Diseño de investigación

El diseño corresponde a la investigación cuantitativa, descriptiva y correlacional, se tiene el sostenimiento convencional efectuado en la mina, y la aplicación del nuevo sostenimiento con un diseño adecuado y garantizado de acuerdo a la investigación efectuada con respecto a la implementación de un Sistema de monitoreo en un pilar del cuerpo Pamela en la Unidad Minera Yauricocha.

3.5. Población y muestra

3.5.1. Población

Se considera el empleo del monitoreo en el yacimiento de minero de la Mina Yauricocha.

3.5.2. Muestra

Se determinó como muestra, el monitoreo del sill pillar del cuerpo Pamela en la Unidad Minera Yauricocha.

3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.6.1. Descripción de las técnicas empleadas

a. Recopilación y análisis de data

Se recolectó la información histórica de la implementación del Sistema geocentinel para el monitoreo del sill Pillar del cuerpo Pamela.

b. Observación directa y toma de datos

Se realizó observaciones directas de la implementación del Sistema geocentinel para el monitoreo del sill Pillar del cuerpo Pamela.

c. Búsqueda de información bibliográfica

Se analizó la información proporcionada por la compañía y la información por internet que sirvieron como antecedentes para la aplicación de la implementación del Sistema geocentinel para el monitoreo del sill Pillar del cuerpo Pamela.

3.6.2. Instrumentos de recolección de datos.

- Planos topográficos.
- Reporte de procesos de la implementación del Sistema Geocentinel.
- Informe del monitoreo del sill pillar del cuerpo Pamela.
- Picota, brújula, flexómetro, mapeador.
- Estación Total.
- Libreta de campo.

3.7. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

El proceso de datos se efectuó, mediante el análisis de la implementación del Sistema de monitoreo en un pilar del cuerpo Pamela en la Unidad Minera Yauricocha y se calculó mediante los reportes quincenales y mensuales de mina donde indicó las tareas empleadas en el mes.

3.8. Tratamiento estadístico

Las acciones que se aplicaron sobre las unidades experimentales y que son objeto de comparación son los sostenimientos convencionales realizados y la comparación con el sostenimiento mecanizado aplicado. Permittiéndonos obtener una estadística dentro de todos los procesos efectuados obteniendo un modelo estadístico que refleja los resultados obtenidos.

3.9. Orientación ética filosófica y epistémica

La investigación se efectuó teniendo en consideración los principios de la ética personal y profesional, permitiéndonos detallar toda la información obtenida en todo el estudio realizado en la presente investigación.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción del trabajo de campo

El sistema de monitoreo por corte, denominado Geocentinela, constituye una solución tecnológica avanzada y fundamental para la gestión de riesgos geotécnicos en minería subterránea, ya que permite el seguimiento en tiempo real de la estabilidad estructural del sill pillar, vigilando de forma continua su posible colapso o deformación progresiva, así como la propagación o ampliación del área de subsidencia hacia zonas críticas. Esta capacidad de detección temprana es vital para predecir y mitigar riesgos inminentes, garantizando directamente la seguridad integral del personal, protegiendo los equipos e infraestructura de alto valor de un colapso súbito, y preservando la estabilidad global de la zona de minado, lo que en conjunto convierte a este sistema en una herramienta indispensable para la operación minera sostenible y segura.

4.1.1. Geocentinela

El sistema de monitoreo por corte es una herramienta esencial para vigilar la estabilidad del sill pillar, ya que permite detectar su posible colapso o deformación, un evento que desencadena un hundimiento localizado y la posterior expansión del cono

de subsidencia. Esta inestabilidad resultante no solo compromete la seguridad de las personas y equipos en las labores mineras circundantes, sino que también aumenta la altura del caving y propaga tensiones geomecánicas hacia zonas aledañas. Como consecuencia, se generan graves riesgos operacionales y retrasos productivos que afectan directamente el normal desarrollo de la explotación minera.

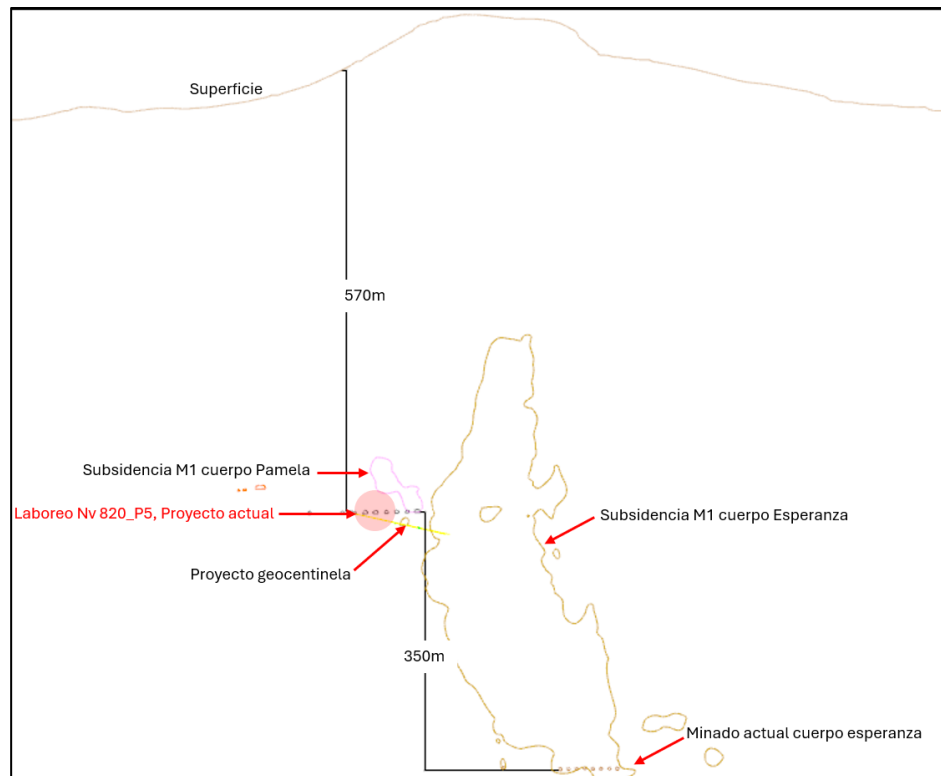
4.1.2. Ubicación del proyecto

La ubicación del espacio vacío dejado por la explotación del cuerpo Esperanza (M1) fue el primer paso para direccionar los taladros de sondaje y los cables del geocentinela, ya que el cercano cuerpo Pamela se ve afectado por la redistribución de esfuerzos generada por esta zona minada.

El proyecto en estudio se encuentra influenciado bajo tres condiciones principales. el primero, se encuentra bajo un encampane de 570m desde la superficie; el segundo, afectados por la zona de influencia de la subsidencia M1 de cuerpo Esperanza el cual es relativamente cercano al cuerpo Pamela; tercero, el redireccionamiento de los esfuerzos producto del M1 producto del minado del cuerpo esperanza años anteriores.

Los sondajes de explotación se realizaron previa construcción de una infraestructura fortificada de acuerdo a las características del macizo rocoso. Los sondajes fueron orientados hacia la subsidencia del M1 del cuerpo esperanza. La ubicación actual del proyecto de instalación del Geocentinela se encuentra ubicado en el Nv 820-P5 del cuerpo Pamela a 570m desde la superficie y a 350m de la parte baja del minado actual del cuerpo esperanza, Nv 1170-P5 ver figura siguiente figura

Figura 38. Vista transversal de la ubicación del proyecto.



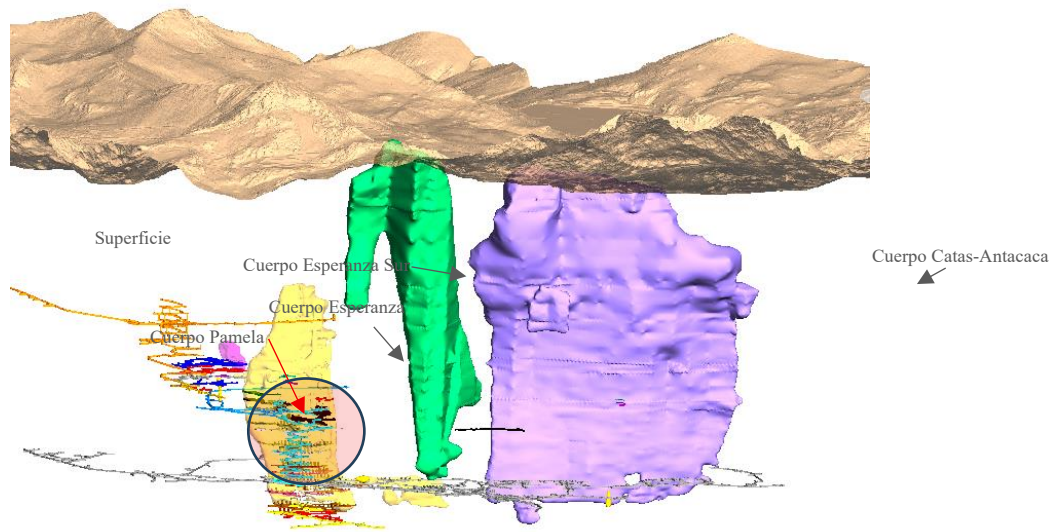
Fuente. Elaboración propia.

Tabla 10. Proyecto de taladros para la instalación del Geocentinela

ID TALADRO	COORDENADAS			AZIMUT	DIP	Longitud del proyecto (m)	Longitud de Geocentinela (m)	CANAL	Cableado	Condición
	ESTE	NORTE	COTA							
D_PAM_12_05_01	23625.840	15964.145	4105.1345	102	10	110			NO	No corta vacío
D_PAM_12_05_02	23624.813	15963.968	4105.1164	70	15	146			NO	Culminado, se encontró vacío de 50 cm de 47m - 47.5m
D_PAM_12_05_03	23625.913	15964.763	4105.1059	152	12	130	95	1	SI	Se evidencia relleno a los 99.40m a 110.70m (11.3m)
							85	2		
							75	3		
							65	4		
D_PAM_12_05_04	23626.167	15965.351	4105.1059	145.5	12	130			NO	Se evidencia a los 57.30 a 57.80 una cavidad. Se evidencia relleno a los 100.20 a 119.60m (19.4m)
D_PAM_12_05_05	23626.411	15966.515	4105.1298	93.86	19.6	130	107	5	SI	Se evidencia relleno a los 92.25m a 104.80m (12.55m)
							95	6		
							85	7		
							75	8		
D_PAM_12_05_06	23626.55	15966.699	4105.721	86	20	130			NO	No corta relleno.

Fuente. Elaboración propia.

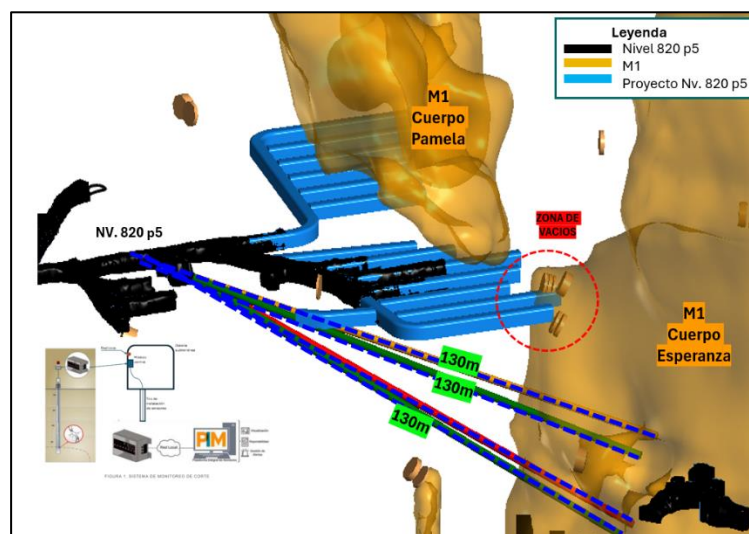
Figura 39. Vista de la ubicación del cuerpo Pamela



Fuente. Elaboración propia.

Una vista isométrica nos permite ver el Nv 820-P5 con la longitud de taladros propuesto a sondear no serán menores a los 130m. La limitante para detener la perforación es al impactar “vacío” el cual se verá reflejado en un cambio descendente de presión en rotación, agua, empuje.

Figura 40. Proyecto plan de monitoreo por corte (geocentinela) hacia la parte baja de las labores de minado.



Fuente. Área de geomecánica

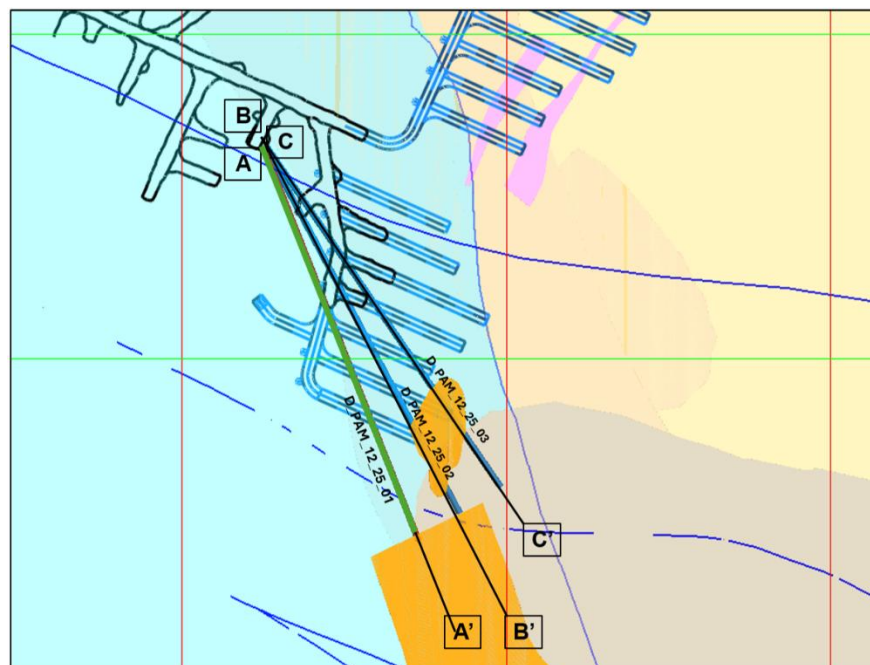
Figura 41. Cambio notorio en la coloración entre una roca fresca y con evidencia de relleno producto del caving.



Fuente. Elaboración propia.

El proyecto se ha iniciado con 3 taladros; estos se incrementará a medida se intercepte la zona de subsidencia M1 del cuerpo esperanza.

Figura 42. Proyecto de sondajes D_PAM_12_25_01, D_PAM_12_25_02 y D_PAM_12_25_03.

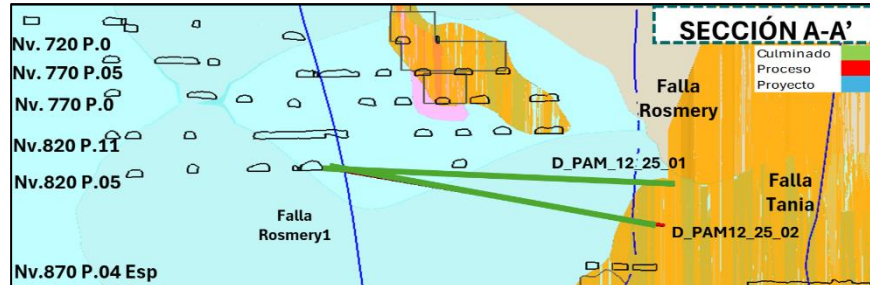


Fuente. Área de geomecánica

Los taladros direccionados muestran que. D_PAM_12_25_01 no ha cortado ningún vacío, mientras que el taladro D_PAM_12_25_02 encontró vacío de 0.5m desde

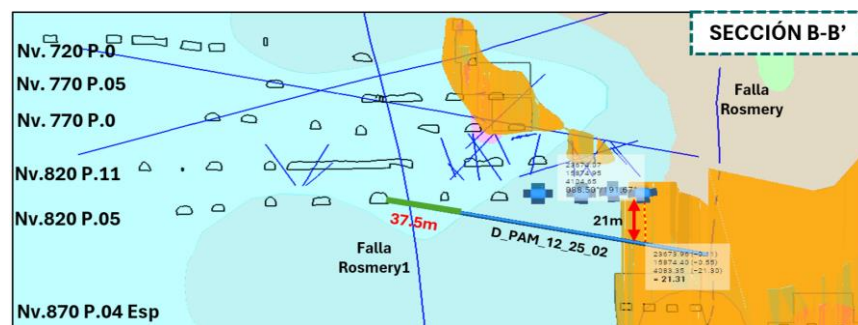
47m - 47.5m; así mismo el taladro D_PAM_12_25_03 se evidencia que ha cortado 11.3m de relleno desde 99.40m a 110.70m.

Figura 43. Proyecto de sondajes corte transversal D_PAM_12_25_01.



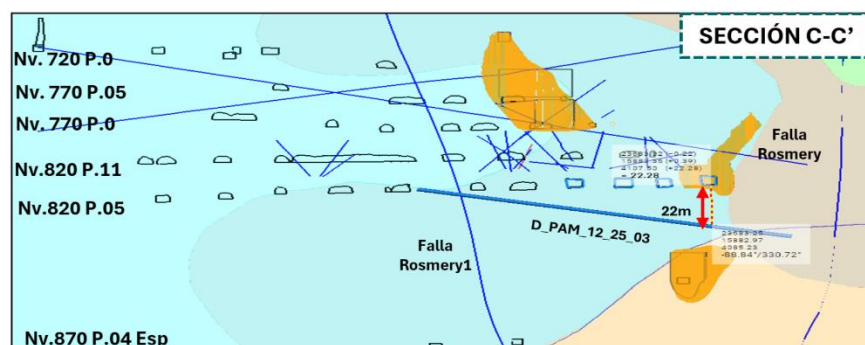
Fuente. Área de geomecánica

Figura 44. Proyecto de sondajes corte transversal D_PAM_12_25_02, la parte final se ubica a 22m por debajo del proyecto de laboreo Nv820_P5.



Fuente. Área de geomecánica

Figura 45. Proyecto de sondajes corte transversal D_PAM_12_25_03, parte final se ubica a 22m por debajo del proyecto de laboreo Nv820_P5.

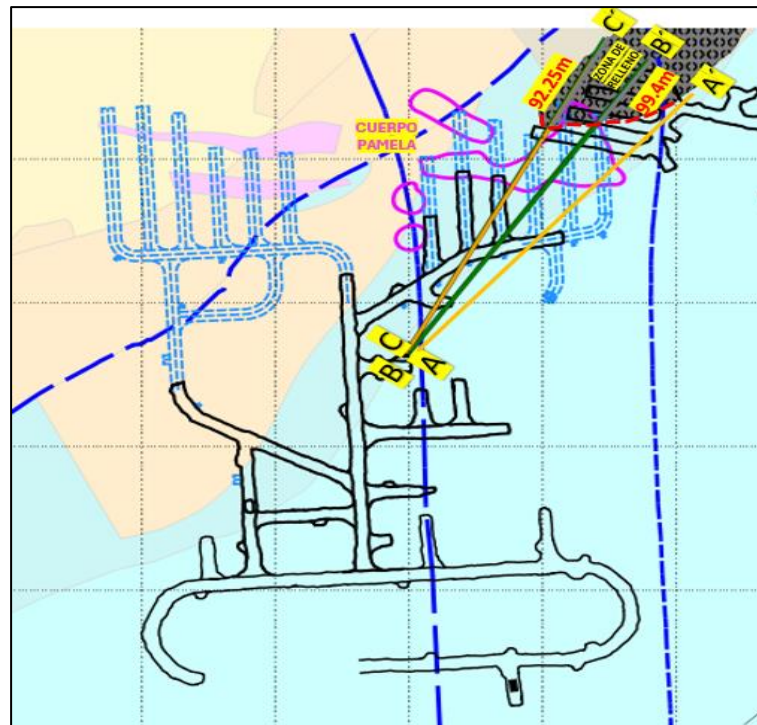


Fuente. Área de geomecánica

Para dar mayor certeza y reconocimiento del M1, se han adicionado 02 taladros de sondaje para tener una mejor representación del sólido geométrico dando como

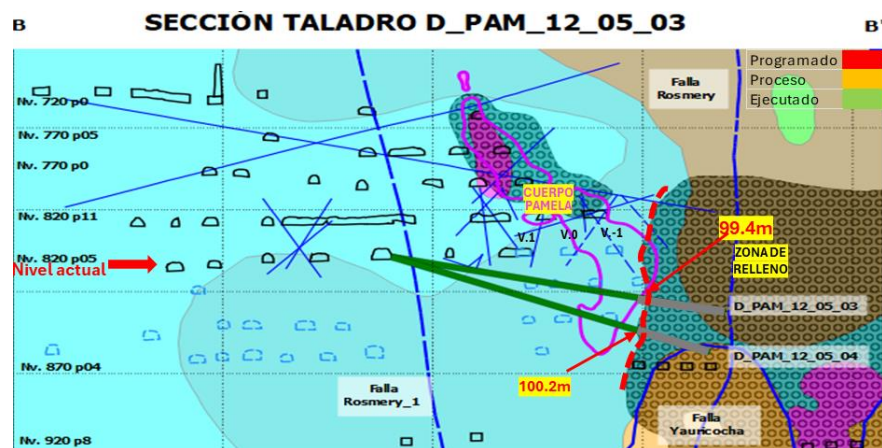
resultado para el taladro D_PAM_25_03 se evidencia relleno a los 99.4 a 119.60m, es decir unos 20.2m; para el taladro de sondaje D_PAM_25_05 se evidencia relleno a los 92.25m a 104.80m, es decir de unos 12.55m. La caracterización hecha en campo muestra valores en zonas de contacto de caliza, caliza alterada y mineral con RMR de entre 31 – 50 macizo rocoso tipo IIIB -IVA. Ver Figura siguiente.

Figura 46. Proyecto de taladros de sondaje



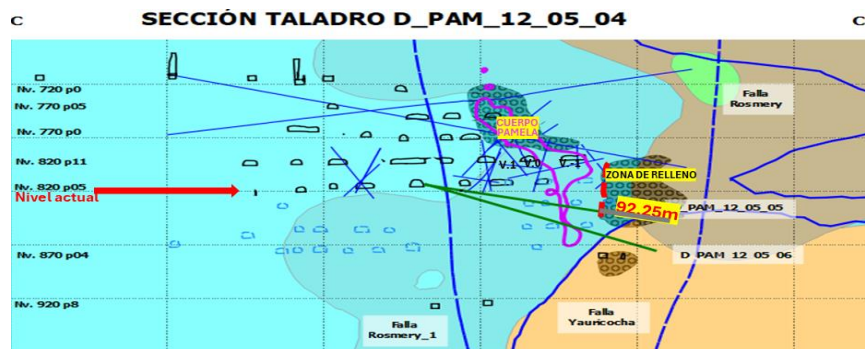
Fuente. Área de geomecánica

Figura 47. Corte transversal del taladro, sección B-B'



Fuente. Área de geomecánica

Figura 48. Corte transversal del taladro, sección C-C'



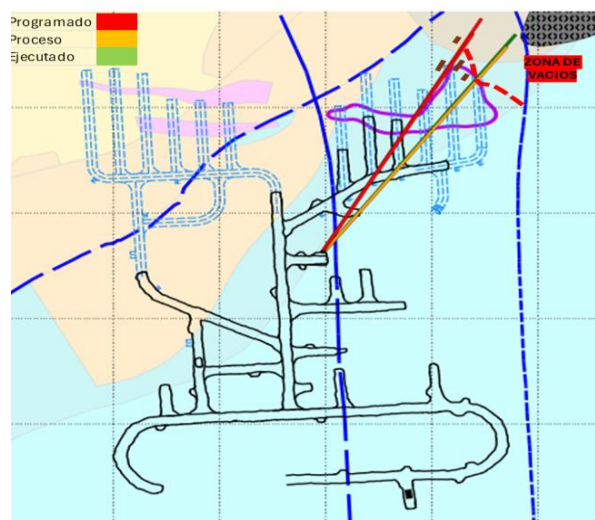
Fuente. Área de geomecánica

4.1.3. Instalación del Geocentinela

Para efectuar la instalación se ha tomado en consideración los taladros con mayor afectación del M1; es decir macizo rocoso con cierta debilidad con potencial de fallamiento afectado por el minado del cuerpo esperanza. Estos taladros son D_PAM_12_25_03 y D_PAM_12_25_04

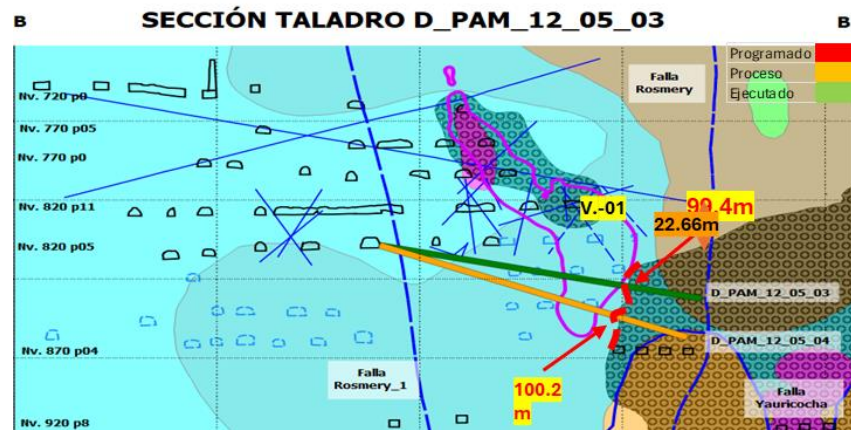
- D_PAM_25_03. Culminado, Se evidencia relleno a los 99.40m a 119.60m, es decir unos 20.2m.
- Taladro D_PAM_25_05 se evidencia relleno a los 92.25m a 104.80m, es decir de unos 12.55m.

Figura 49. Vista en planta de la zona de identificación de vacíos, M1



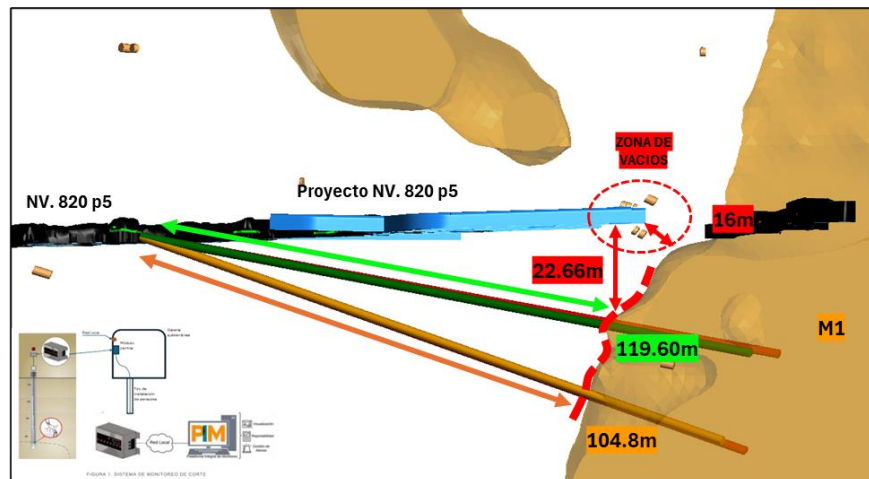
Fuente. Área de geomecánica

Figura 50. Vista en transversal de la zona de identificación de vacíos, M1



Fuente. Área de geomecánica

Figura 51. Vista isométrica de la zona de identificación de vacíos, M1



Fuente. Área de geomecánica

Figura 52. Proceso de instalación del cable Geocentinel

- Instalación de cable al tubo guía

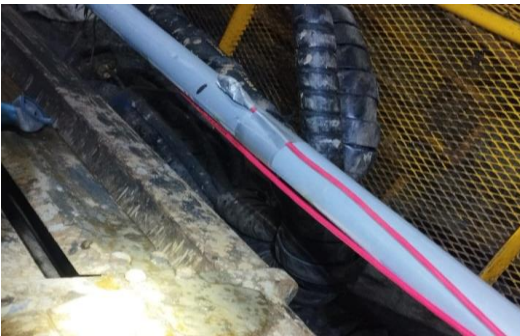


Instalación de cable al tubo guía

Colocación de tubos PVC 1"



Colocación de carretes



Cable protegido con cinta aislante, vulcanizante



Encintado de cables metro a metro

Etiqueta de cables



Etiqueta con sus respectivas longitudes

Medición de continuidad



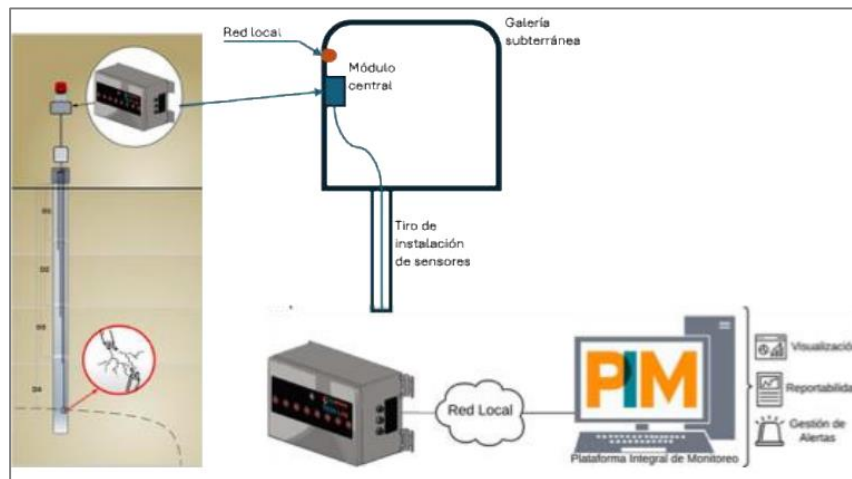
Medición de continuidad antes, durante y después

4.1.4. Funcionamiento del sistema

El sistema contempla un sistema de cable de diferentes medidas (65m, 75m, 85m, 95m y 107m) instalado en el taladro D_PAM_12_25_03 y en el taladro D_PAM_12_25_05 cables de distintas longitudes de (65m, 75m, 85m y 95m); los

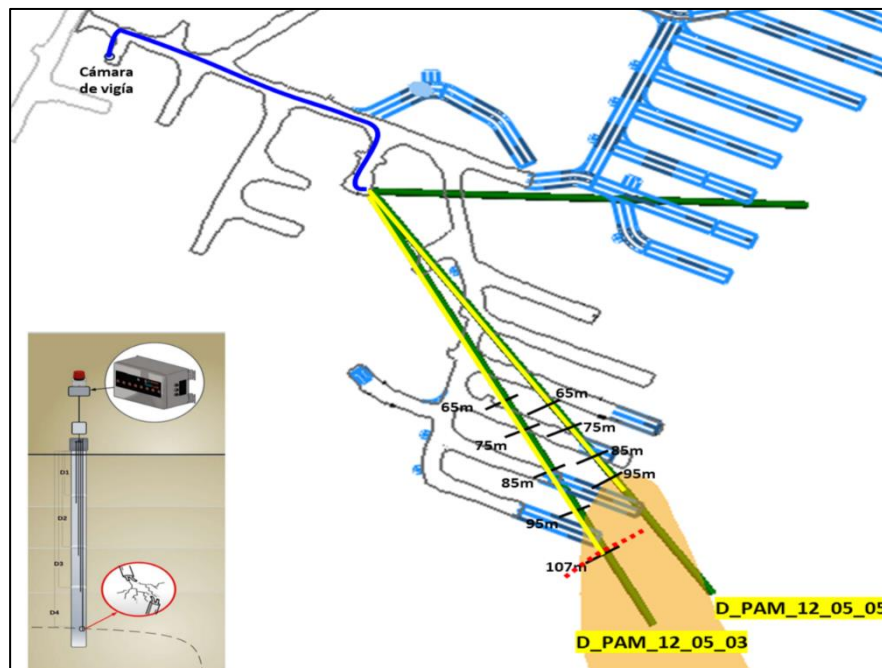
cables con sensores de diferentes longitudes provenientes de los distintos taladros llegan a un módulo central de codificación enlazados a una red local el cual viaja mediante cable de red de fibra óptica hasta la cámara de vigía, punto de monitoreo en la oficina de geomecánica y a la central de monitoreo de la Unidad Minera Yauricocha.

Figura 53. Diagrama resumido del sistema del sistema Geocentinela



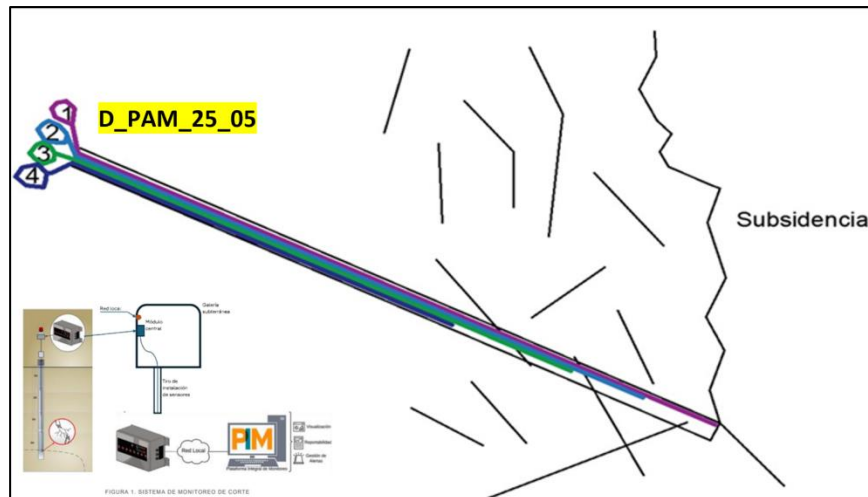
Fuente. E-MiningTecnology

Figura 54. Diagrama de instalación del sistema del sistema Geocentinela



Fuente. Elaboración propia.

Figura 55. Diagrama resumido del sistema de cableado interno en un taladro

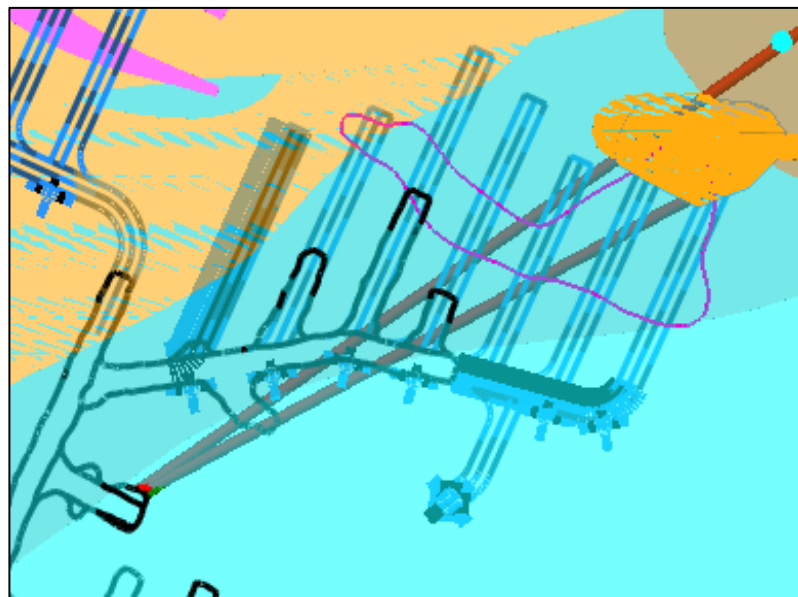


Fuente. Elaboración propia.

4.1.5. Proceso de monitoreo del geocentinel

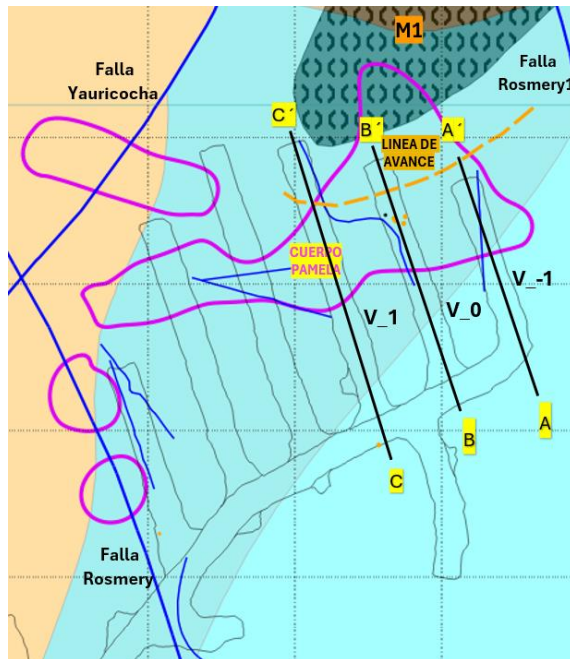
Antes de realizar el avance de la preparación de las ventanas de extracción de mineral se ha realizado la instalación de los geocentinel; esto nos permite realizar la excavación de forma segura tanto en su preparación como el proceso de explotación.

Figura 56. Vista en planta del proyecto Geocentinel y el proyecto de excavación de las ventanas de explotación



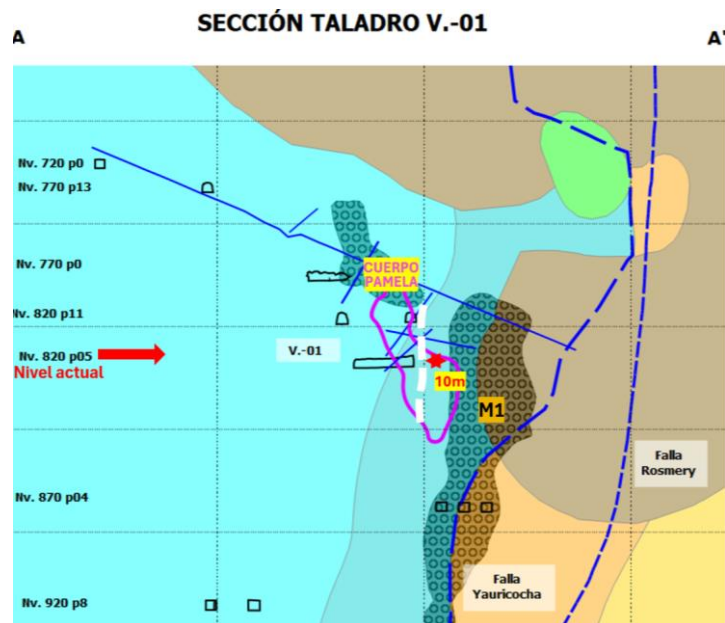
Fuente. Elaboración propia.

Figura 57. Vista en planta de excavación de las ventanas de explotación y su influencia del M1.



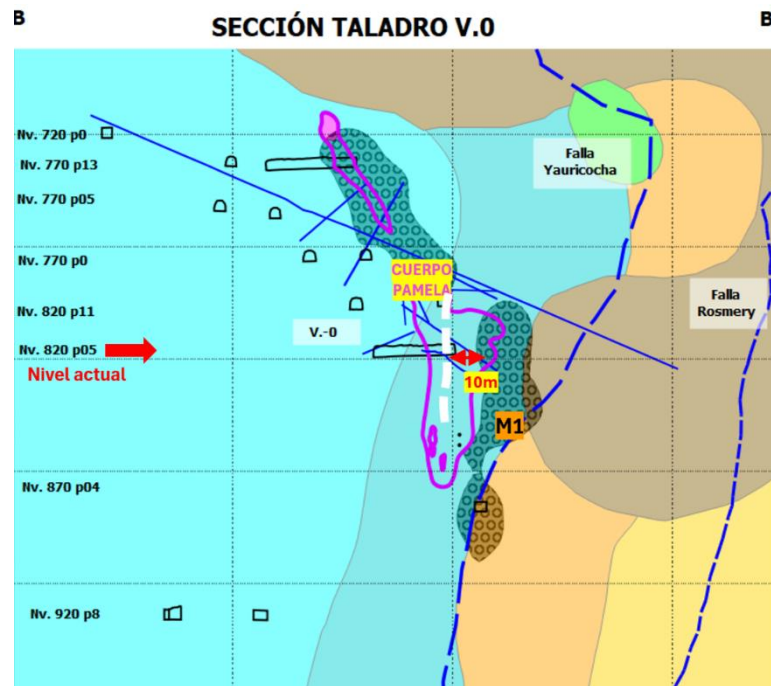
Fuente. Elaboración propia.

Figura 58. Corte transversal de la ventana de explotación V-1 y su influencia del M1, (Corte A-A')



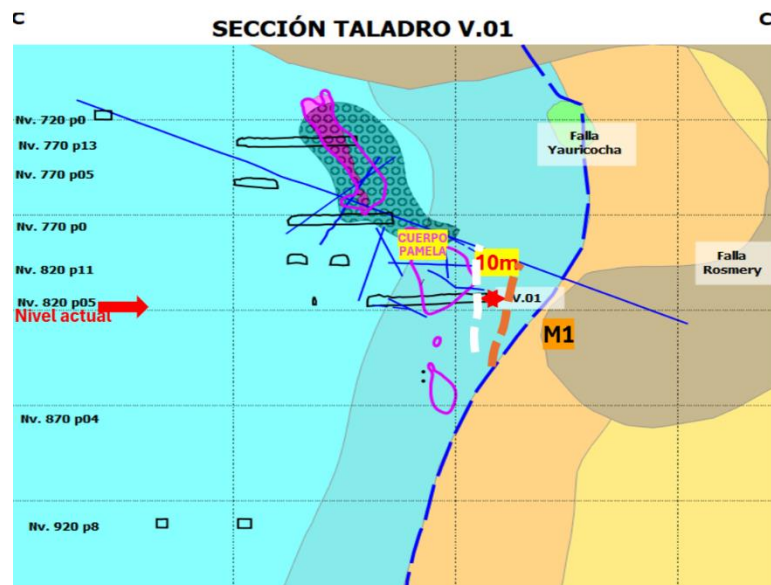
Fuente. Elaboración propia.

Figura 59. Corte transversal de la ventana de explotación V_0 y su influencia del $M1$, (Corte B-B')



Fuente. Elaboración propia.

Figura 60. Corte transversal de la ventana de explotación V_1 y su influencia del $M1$, (Corte C-C')

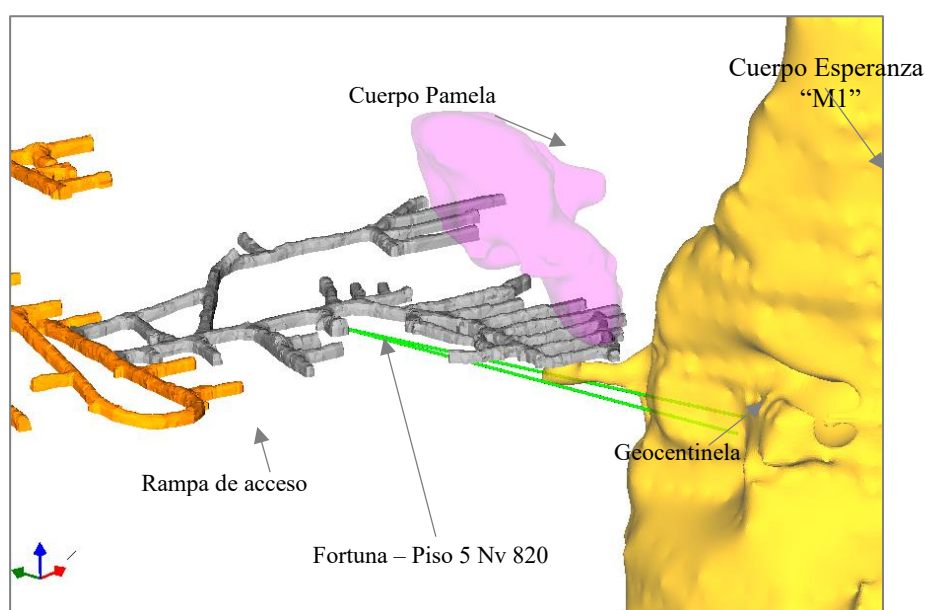


Fuente. Elaboración propia.

4.1.6. Cuerpo Fortuna-Pamela

El cuerpo mineralizado Pamela se encuentra 600m por debajo de la superficie y aledaño al cuerpo más grande, cuerpo Esperanza; con vía de acceso mediante una rampa de sección 4.0x4.0.

Figura 61. Vista isométrica del cuerpo Fortuna y M1 (generado por el cuerpo Esperanza)

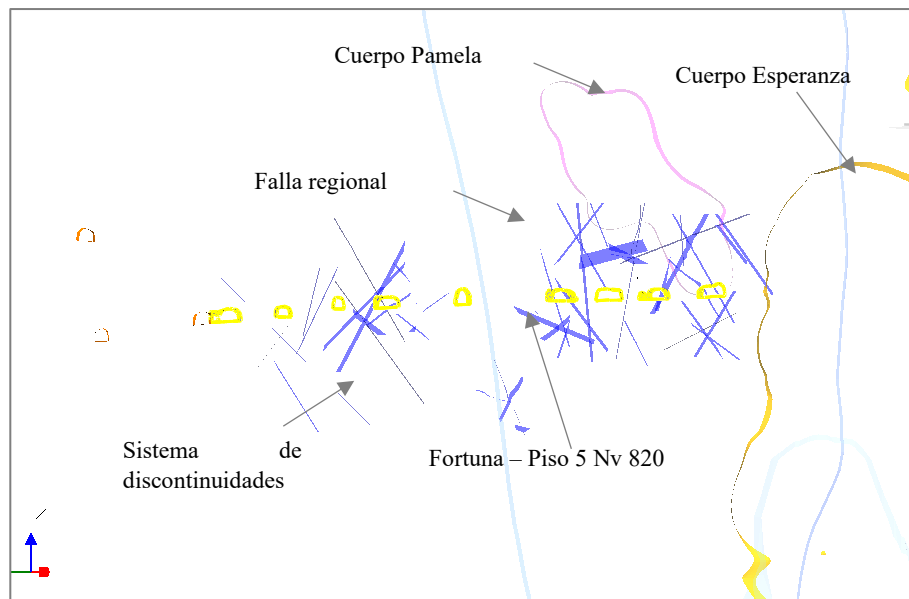


Fuente. Elaboración propia.

4.1.7. Distribución de discontinuidades del cuerpo Fortuna – Pamela

Las discontinuidades están orientadas en sentidos NE-NW con buzamiento de de 40° a 73° en promedio y NW-SE con buzamientos de 30° a 80°. Estas se caracterizan por tener un relleno suave de 1-2mm bituminosos que, en contacto con el agua forman una superficie jabonosa provocando alta probabilidad de desplazamiento entre superficies.

Figura 62. Orientación de discontinuidades presentes Nv 820-P5



Fuente. Elaboración propia.

4.1.8. Clasificación de la masa rocosa

Esta clasificación geomecánica se hizo en base al RMR89 propuesto por Bieniaski, es una versión actualizada y una de las más utilizadas del método de clasificación geomecánica para macizos rocosos. Su objetivo es proporcionar un índice de calidad integral que sirva para el diseño y la construcción de excavaciones en roca. Algunos detalles como.

- Resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta.
- Índice de designación de la calidad de la roca (RQD) .
- Espaciado de las discontinuidades (diaclasas, fallas).
- Condición de las discontinuidades (persistencia, abertura, rugosidad, relleno, meteorización).
- Condiciones del agua subterránea (caudal, presión, o estado general de humedad).

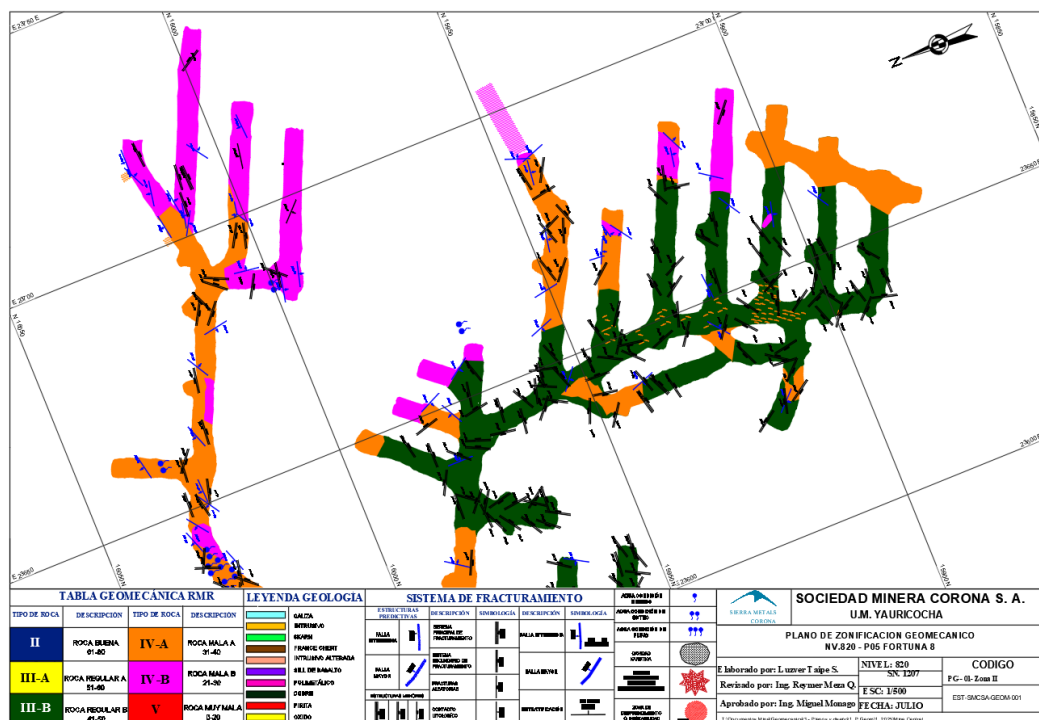
Estos parámetros nos han permitido clasificar el macizo rocoso del Piso 5 Nv 820, cuerpo Pamela en la clasificación de IIIB, IVA, IVB, la imagen siguiente corresponde código de colores propio de la Unidad Minera Yauricocha para clasificar el macizo rocoso.

Tabla 11. Código de colores para la clasificación del macizo rocoso

TABLA GEOMECÁNICA RMR			
TIPO DE ROCA	DESCRIPCIÓN	TIPO DE ROCA	DESCRIPCIÓN
II	ROCA BUENA 61-80	IV-A	ROCA MALA A 31-40
III-A	ROCA REGULAR A 51-60	IV-B	ROCA MALA B 21-30
III-B	ROCA REGULAR B 41-50	V	ROCA MUY MALA 0-20

Fuente. Área de geomecánica

Figura 63. Plano geomecánico Nv 820 – P5 –cuerpo Pamela



Fuente. Elaboración propia

4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados

Debido a la complejidad geomecánica del macizo rocoso y la presencia de zonas mineralizadas con alta anisotropía estructural, los sill pillar constituyen elementos críticos para la estabilidad general. La implementación del Sistema Geocentinela en estos pilares ha permitido establecer un control predictivo de las tensiones y deformaciones, garantizando operaciones seguras y sostenibles. Este estudio detalla su aplicación y los cálculos geomecánicos característicos.

4.2.1. Funcionalidad y ventajas en la aplicación al sill pillar

El Sill Pillar, debido a su rol estructural en el sistema de excavaciones, es una unidad geomecánica de máxima prioridad para monitoreo. La aplicación de Geocentinela aporta las siguientes funciones críticas.

Detección temprana de deformaciones

Los sensores logran cuantificar desplazamientos del orden de décimas de milímetro. Esto permite.

- Determinar comportamientos elásticos versus plásticos.
- Detectar la iniciación de zonas de cizalla o fracturamiento progresivo.
- Validar el factor de seguridad en operación.

Análisis del comportamiento bajo ciclos de minado

El control continuo permite correlacionar.

- Avance de taladros de producción.
- Explosiones controladas.
- Excavación de cámaras o subniveles.
- Variación de tensiones internas en el sill pillar.

4.2.2. Beneficios operacionales estratégicos

El uso del equipo Geocentinela en sill pillar ofrece impactos directos.

- **Seguridad del personal.** reducción del riesgo de colapso súbito.
- **Optimización económica.** posibilidad de liberar mayores recursos mediante explotación controlada.
- **Mayor vida útil de mina.** permite decisiones estratégicas basadas en evidencia.
- **Automatización del control geomecánico.** reduce exposición del personal a zonas críticas.

4.2.3. Limitaciones y desafíos

Como toda tecnología avanzada, presenta limitaciones como.

- Requiere personal entrenado.
- Su costo inicial puede ser elevado.
- Depende de la calidad de instalación y calibración.
- La interpretación debe complementarse con modelación numérica y juicio geotécnico.

4.2.4. El Sill Pillar en la mina Yauricocha

Los Sill Pillar actúan como diafragmas horizontales entre cuerpos mineralizados explotados.

Funciones principales

- Sostener niveles superiores.
- Evitar colapsos progresivos.

- Mantener continuidad de minado.

Dimensiones Típicas

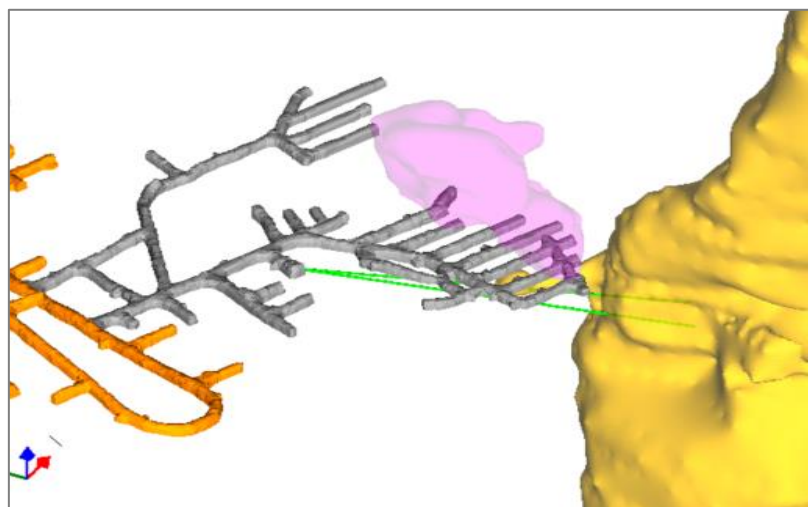
- Espesor. 50 m
- Ancho. altamente variable según la estructura mineralizada (120 m)
- Longitud. 120 - 200m

Riesgos geomecánicos

- Concentración de tensiones.
- Daño sísmico inducido.
- Pandeo del pilar.
- Fallas tipo cortante.

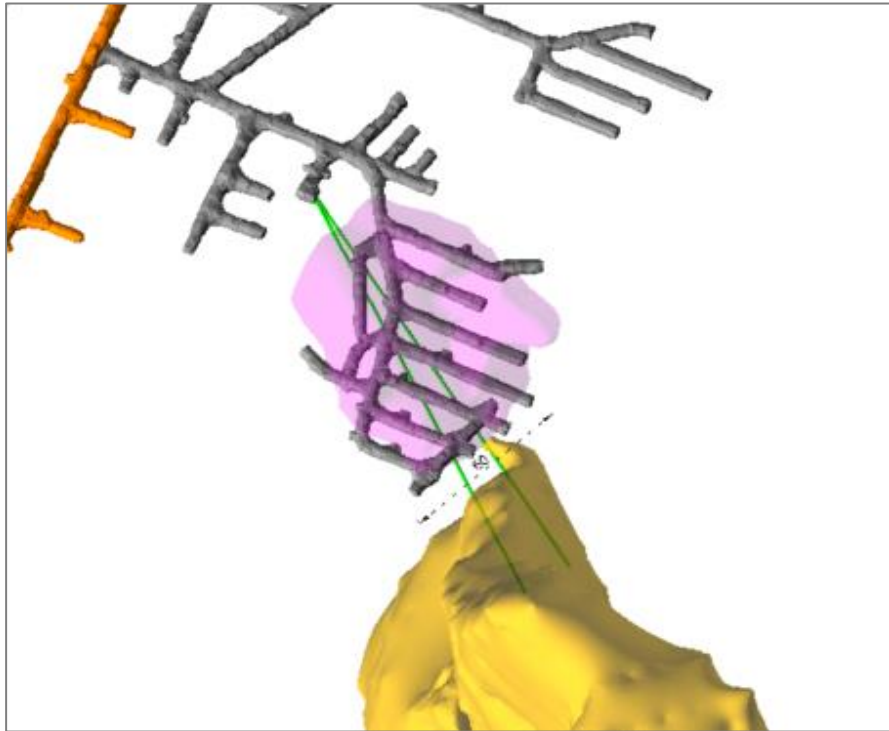
A continuación se presentan en las figuras. los planos en planta y en sección, las condiciones geotécnicas y riesgos geotécnicos de los taladros en el cuerpo Pamela, el sistema de monitoreo y los protocolos de evacuación que se lleva a cabo en la Unidad Yauricocha.

Figura 64. Altura de la zona de afectación 120m – 200m



Fuente. Elaboración propia.

Figura 65. *Espesor y ancho del cuerpo pamela 50m x 120m para el piso Nv 820-P5*



Fuente. Elaboración propia.

4.2.5. Inicio del sistema de monitoreo

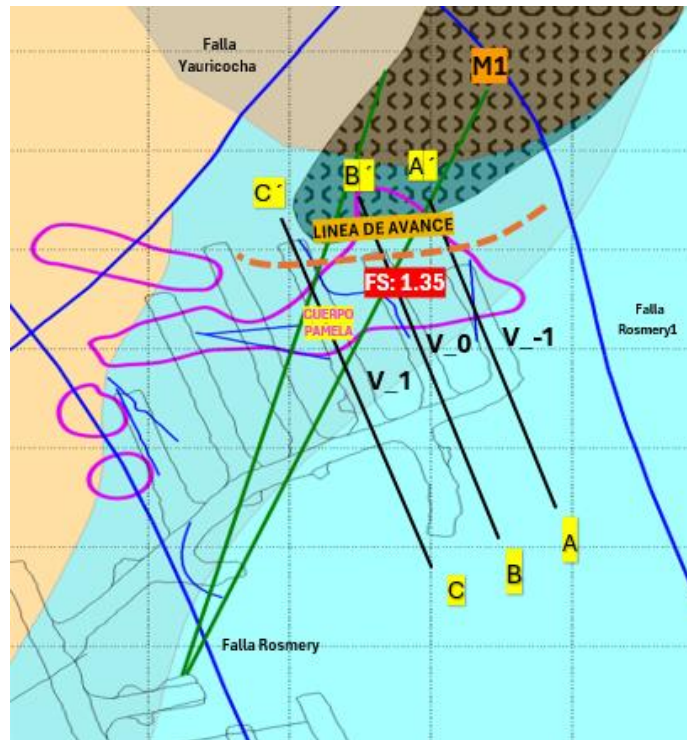
Nv. 820 P.05 Pamela – modelo de vacíos - Condiciones y riesgos geotécnicas

Se presenta, el plano en planta Nv. 820 P5 Pamela, con sus respectivas secciones de taladro V-01; siendo sus condiciones geotécnicas. Ver figuras N°23 y N°24.

- Se tiene proyectado el M1 a los 11m del tope de la V.-01
- Se tiene proyectado el M1 a los 4m del tope de la V.0
- Se tiene proyectado el M1 a 2m hacia la derecha del tope de la V.01.
- Sus riesgos geotécnicos.
- Hundimiento local (colapso del sill pillar)
- Propagación del cono de subsidencia.
- Aumento en la inestabilidad en las labores aledañas.

- Generación de mayor altura del caving (hundimiento) y propagación de esfuerzos (eventos microsísmicos en áreas cercanas).

Figura 66. Ventanas de explotación respecto al M1 y taladros donde se ubican el Geocentinela..



Fuente. Elaboración propia.

Monitoreo del Cable de Geocentinela

El estado del cable de geocentinela es supervisado de forma integral mediante la cámara de vigía. Este sistema proporciona un monitoreo dual. por un lado, ofrece una verificación visual que permite inspeccionar mediante un pantalla en la cual muestra la luz estroboscópica con el led indicador en el tablero indicador de rotura ante un eventual corte del cable; por otro lado, incorpora un sistema acústico que se activa al detectar cambios en los indicadores LED. Para ambos casos el personal vigía es alertando ya sea de manea visual o sonora para la activación del push botón y evacuación de todo el

personal que se encuentra en la zona de influencia producto de la rotura del cable geocentinel.

Activación de la Alarma

El puesto de vigía está sujeto a estrictos protocolos. El operador está capacitado con procedimientos específicos reforzados con simulacros frecuentes y tener turnos con pausas activas para combatir la fatiga. El "Push Button" debe ser de tipo palm-button o hongo (para fácil activación incluso bajo estrés), de color rojo, y debe probarse diariamente para verificar su funcionamiento.

Respuesta a la Emergencia

La alarma es insonorizada con un patrón de sonido único y una luz estroboscópica que se activa con el led del tablero indicador de rotura ante un eventual corte del cable.

El personal se encuentra capacitado para evacuar y dirigirse al punto de reunión (cámara de Vigía) como punto de concentración para la reunión de todo el personal que labora en la zona de influencia del cable geocentinel. Este punto de reunión o cámara de vigía se una zona segura que se encuentra bien iluminada, ventilada, con vías de escape claras y alejado de la subsidencia. El personal debe conocer al menos dos rutas de escape diferentes para llegar a él.

Comunicación de la Emergencia

La activación de un módulo LED en un tablero electrónico es la forma que tiene el sistema de indicar una anomalía, un cambio de estado o una alarma que requiere atención. Esta señal luminosa estroboscópica es el inicio de una cadena de respuestas.

Por lo tanto, el vigía que identifique un módulo en estado de "activado" (luz estroboscópica parpadeante) tiene la responsabilidad primordial de presionar el push

botón para la activación de la sirena reportando de forma inmediata a la sala de control mencionando la hora del evento. La notificación debe hacerse sin demora a la sala de control, que es el centro neurálgico para la gestión de incidentes.

Figura 67. Diagrama del sistema de instrumentación con representación LED, del sistema geocentinela.



Fuente. Elaboración propia

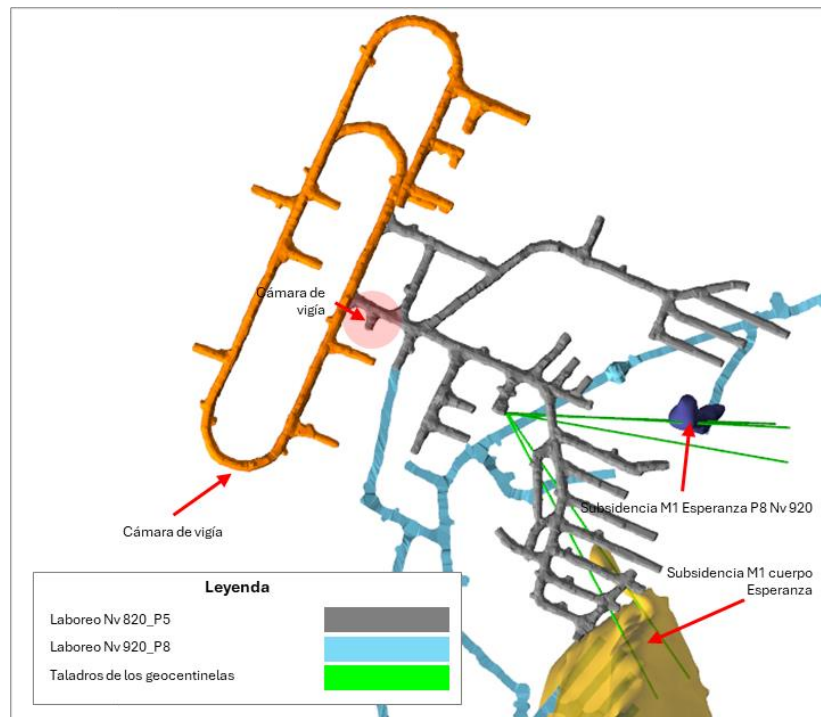
Gestión Centralizada de la Crisis

La sala de control recibe la alarma y coordina con las áreas correspondientes. Superintendencia de Mina, Geomecánica y Planeamiento, para su intervención rápida."

Toma de Decisión Informada

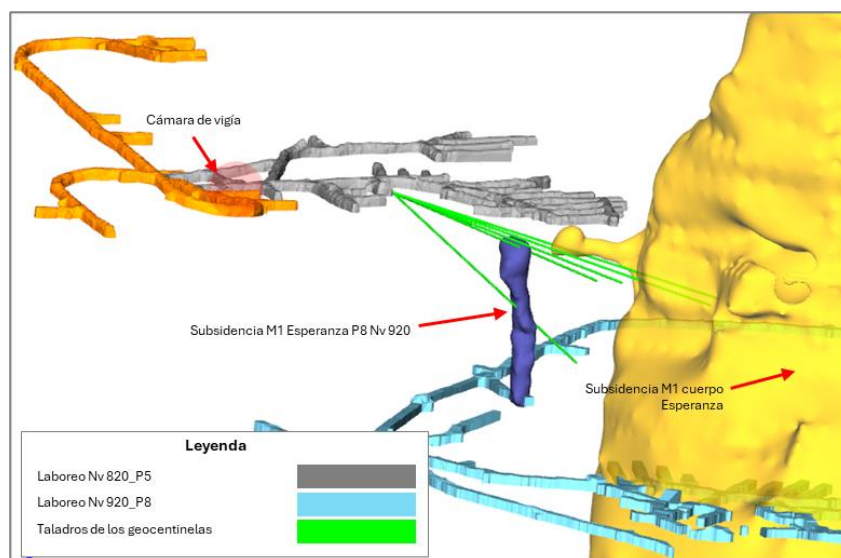
La inspección liderada por Geomecánica en conjunto con las áreas de Seguridad, Mina y planeamiento realizan la evaluación visual de acuerdo a la interpretación del sistema de instrumentación geocentinela modelado la nueva geometría de la cavidad (incremento de la subsidencia). Estas inspecciones se realizan de forma visual por el equipo multidisciplinario emitiendo un informe técnico para retomar las operaciones de explotación o paralizarlo de forma definitiva.

Figura 68. Vista general en planta del proyecto de instalación del sistema geocentinela.



Fuente. Elaboración propia.

Figura 69. Vista isométrica en planta del proyecto de instalación del sistema geocentinela.



Fuente. Elaboración propia.

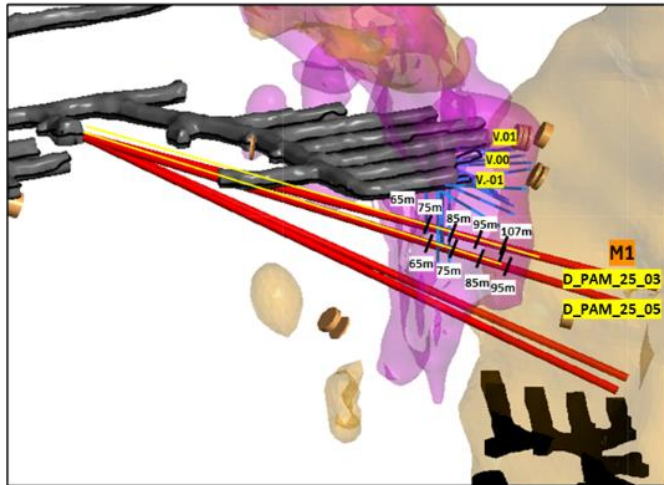
4.2.6. Monitoreo

- Se presenta a través de una vista isométrica en el cuerpo Pamela, la instalación del cable geocentinela y se realiza una descripción del proceso de evacuación que consiste en. Ver figura N°69.
- El cable de geocentinela se controla y se monitorea de manera visual y sonora con la cámara de vigía.
- Si el cable se rompe, el vigía, al observar la cámara, presionará el Push Boton.
- Al sonar la alarma, el personal debe evacuar y concentrarse en el punto de vigía.
- Al identificar el módulo activado se debe notificar inmediatamente a la sala de control, indicando que módulo y su ubicación.
- La sala de control recibe la alarma, evalúa la situación y coordina con las áreas correspondientes. Superintendencia de Mina, Geomecánica y Planeamiento, para su intervención rápida.
- Se realiza una inspección multidisciplinaria, se evalúan los riesgos y se actualizan los controles para decidir si se continua con el minado y actividades.

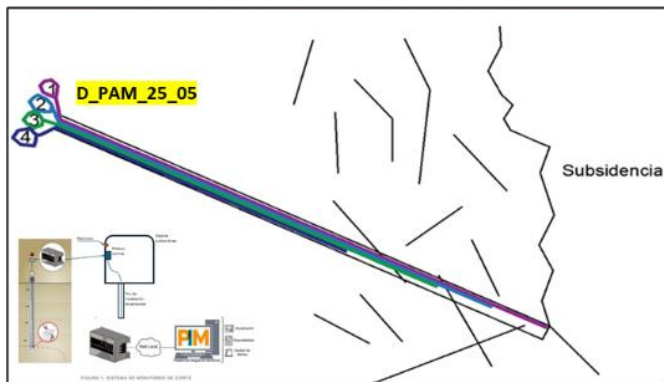
Figura 70. Sistema de monitoreo y proceso de evacuación

IMPLEMENTACIÓN SISTEMA DE MONITOREO

Vista Isométrica



Instalación de Cables Geosentinelas



Proceso de Evacuación

1. El cable de geocentinela se controla y se monitorea de manera visual y sonora con la cámara de vigía.
2. Si el cable se rompe, el vigía, al observar la cámara, presionará el Push Boton.
3. Al sonar la alarma, el personal debe evacuar y concentrarse en el punto de vigía.
4. Al identificar el módulo activado se debe notificar inmediatamente a la sala de control, indicando que módulo y su ubicación.
5. La sala de control recibe la alarma, evalúa la situación y coordina con las áreas correspondientes: Superintendencia de Mina, Geomecánica y Planeamiento, para su intervención rápida.
6. Se realiza una inspección multidisciplinaria, se evalúan los riesgos y se actualizan los controles para decidir si se continua con el minado y actividades.

Fotografías de Instrumentación



Difusión



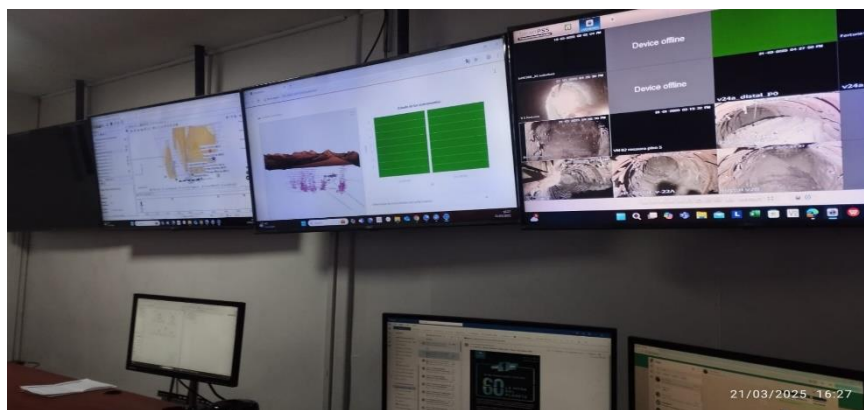
Fuente. Área de Geomecánica

4.2.7. Sistema de monitoreo Geocentinela

Sistema de monitoreo

Se hace la descripción del centro del control, con el monitoreo del sill pillar con geocentinela de corte; asimismo, el centro de control geomecánica y el estado de los instrumentos y el estado de cables.

Figura 71. Centro de monitoreo del sistema geocentinela de vigilancia constante



Fuente. Elaboración propia.

Figura 72. Monitoreo del sistema geocentinela, centro de control oficina de geomecánica



Fuente. Elaboración propia.

Figura 73. *Canales de visualización de los cables geocentinela*



Fuente. Elaboración propia.

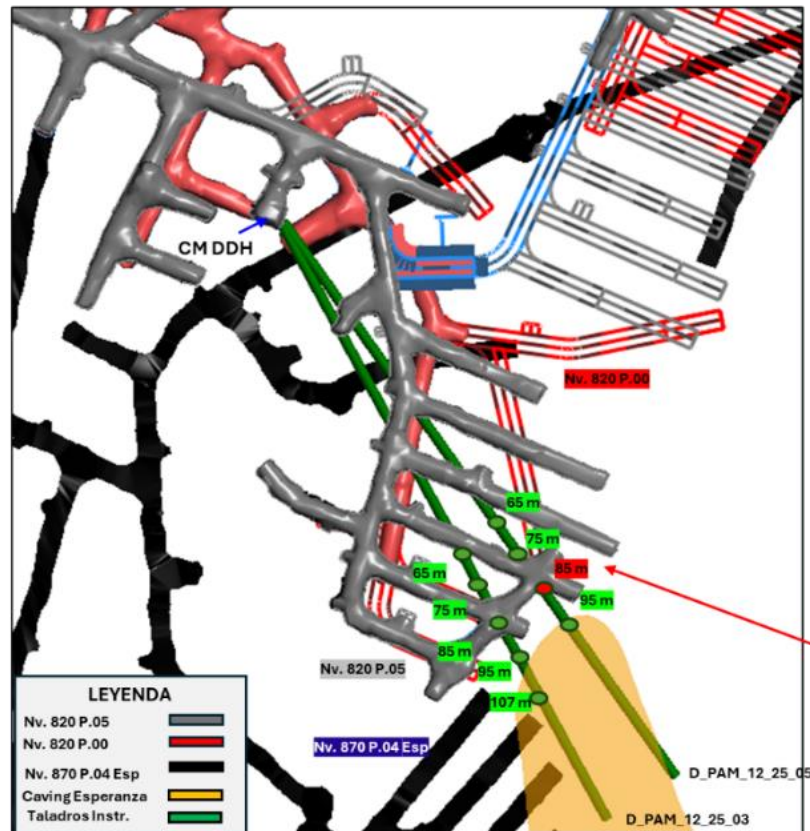
Rotura de Cable Geocentinela

Se presenta el plano con vista en planta, así como la vista isométrica – Fortuna Nv.820 P5; con encendido de la baliza alarma rojo y alerta en centro de control y monitoreo. Instrumento CW-GC-presenta un corte en el canal 7 a las 23.31Hrs. el día 24-03-25.

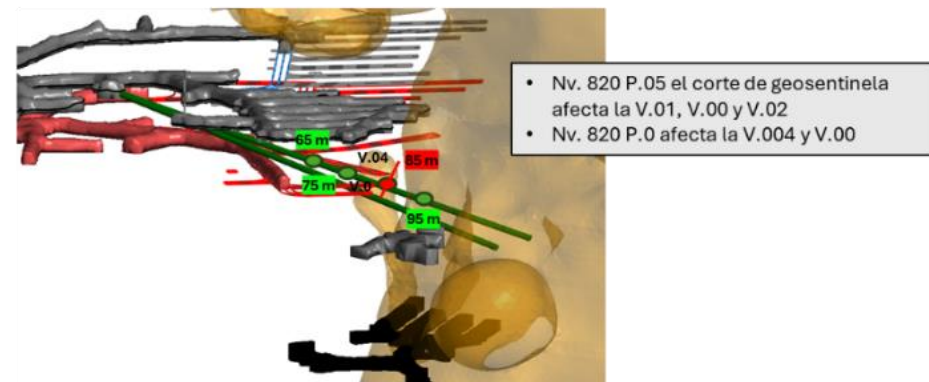
Figura 74. Rotura del cable geocentinel

ROTURA DE CABLE GEOCENTINELA. 23.03.25

- Vista en planta – Fortuna Nv.820 P5



- Vista Isometrica – Fortuna Nv.820 P5



- ENCENDIDO DE LA BALIZA. Alarma roja



- ALERTA EN CENTRO DE CONTROL Y MONITOREO



Fuente. Elaboración propia.

4.2.8. Gestión de vacíos hacia los pisos inferiores

Gestión de riesgo 1 (vacíos) – Fortuna P

Se presenta el plano con vista isométrica – Fortuna Nv.820 p0, se revisó el sistema de monitoreo en la labor y se verifica la operatividad de la baliza y sirena.

En el plano en planta Nv. 820 PO;

- a. Se observa la rotura del cable geocentinela instalado a los 85m del taladro D_PAM_25_05
- b. Se determinó realizar un avance de las ventanas V0, V.0 1y V.04 de acuerdo a las siguientes longitudes.

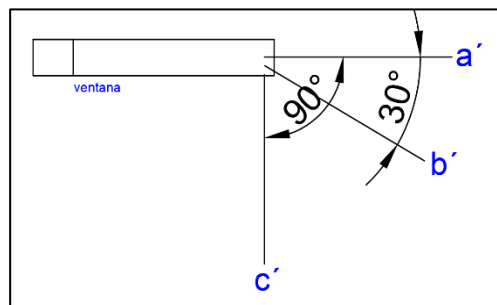
V.00. 10 metros. (Máximo).

V.01. 10 metros. (Máximo).

V.04. 20 metros. (Máximo).

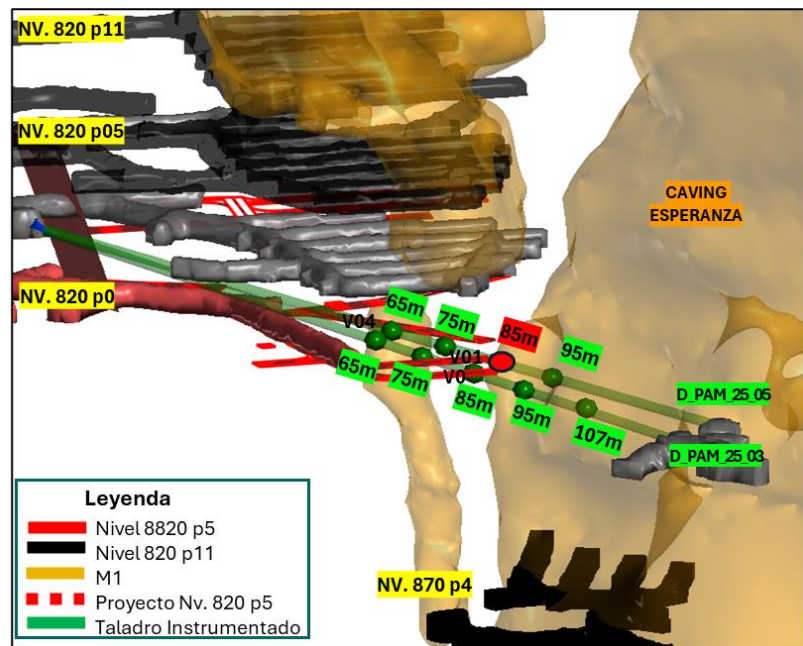
- c. Se propone un diseño de 3 taladros de auscultación por cada ventana de 18m de longitud cada una, negativos y paralelos para delimitar más finamente el modelo de vacíos (reconocimiento de zona de caving pisos inferiores).

Figura 75. Orientación de sondajes de auscultación



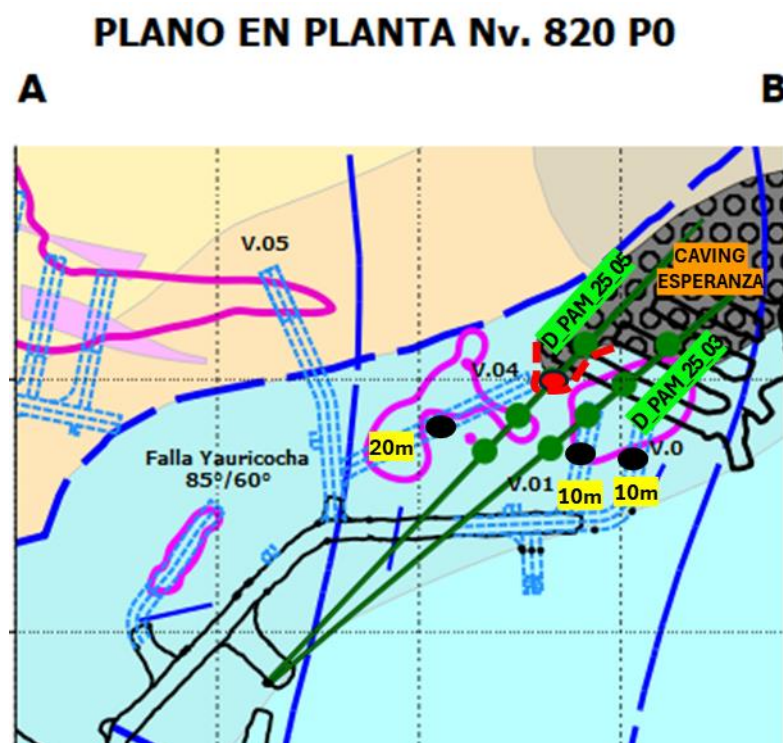
Fuente. Elaboración propia.

Figura 76. Vista isométrica de la ubicación de la rotura cable (a los 85m)



Fuente. Elaboración propia.

Figura 77. Vista en planta de la ubicación de la rotura cable (a los 85m)



Fuente. Elaboración propia.

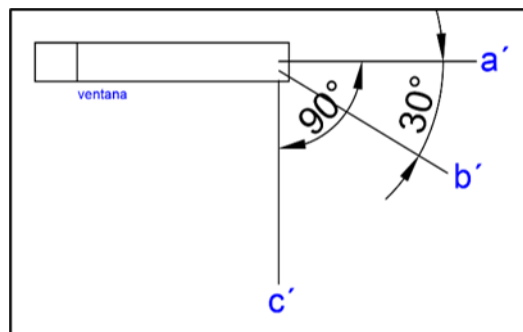
Gestión de riesgo 2 (vacíos) – Fortuna P

También se considera el plano con vista isométrica – Fortuna Nv.820 p0, con riesgo bajo y alto; y se tiene la rotura de los 5 cables geocentinelas instalados en el taladro D_PAM_25_05 a las siguientes longitudes. 65, 75, 85, 95, 107 metros.

Se determinó dejar un escudo hacia las ventanas V0, V.0 1y V.04 con respecto al caving estimado.

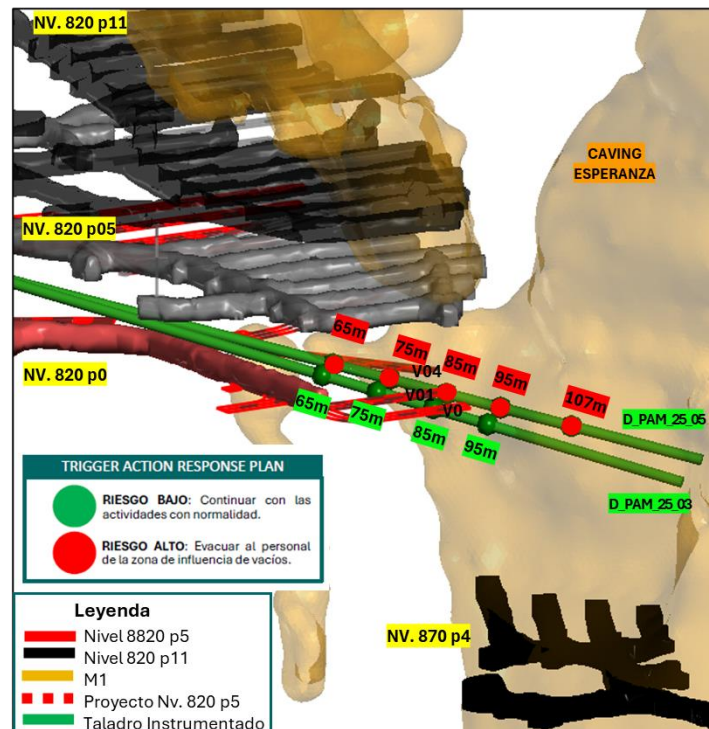
Se propone después de cumplir el avance programado realizar taladros de auscultación de 18m positivos, negativos y paralelos para delimitar más finamente el modelo de vacíos (reconocimiento de zona de caving pisos inferiores).

Figura 78. Orientación de sondajes de auscultación



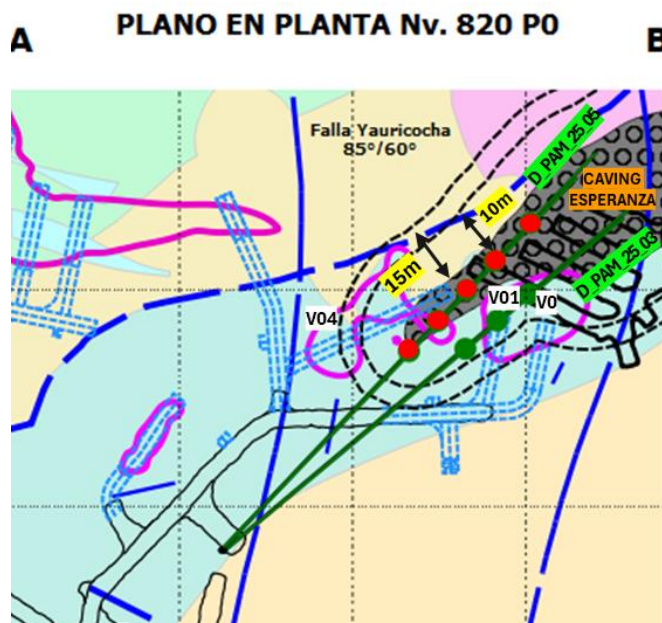
Fuente. Elaboración propia.

Figura 79. Ubicación de la rotura cable (a los 65, 75, 85, 95, 107m)



Fuente. Elaboración propia.

Figura 80. Vista en planta de la ubicación de la rotura cable (65, 75, 85, 95, 107m)



Fuente. Elaboración propia.

Gestión de riesgo 3 (vacíos) – Fortuna P

Se presenta una vista isométrica con riesgo bajo y riesgo alto; con reporte de sondajes Fortuna P Nv.820 p0 – Ventana 00.

Taladro 4. Conecta al caving a 8 barras (9.6m).

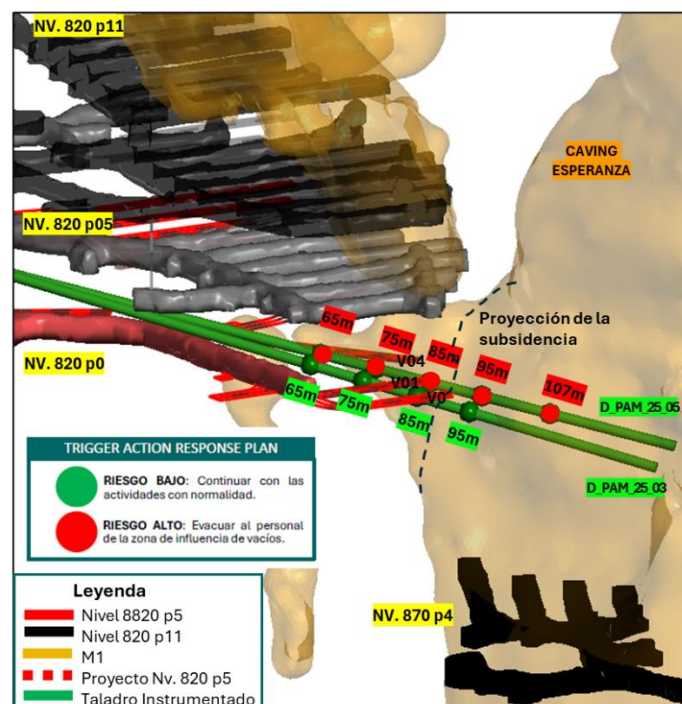
Taladro 6. Conecta al caving a 11 barras (13.2).

Taladro 8. Conecta al caving a 8 barras (9.6m).

Taladro 9. No conecta al caving.

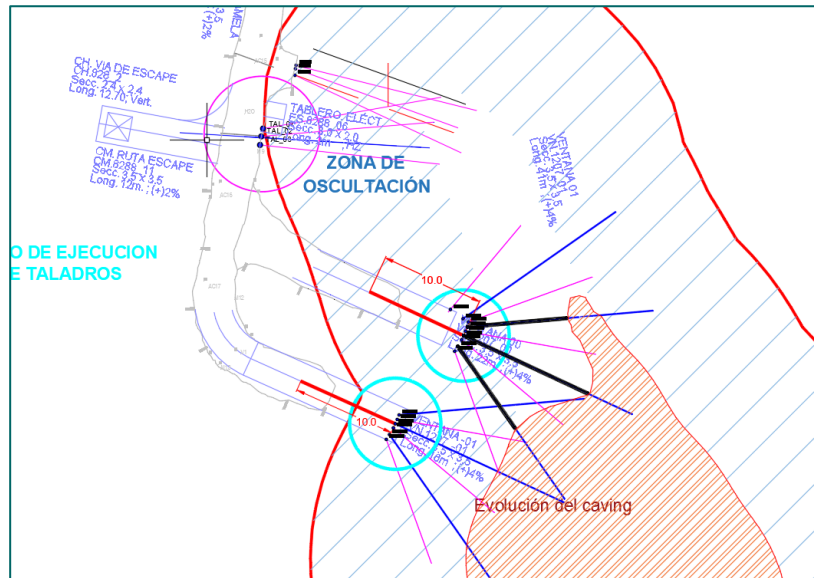
Se recomienda paralizar el avance de la ventana.

Figura 81. Proyección de la subsidencia del cuerpo Esperanza hacia la zona de minado del cuerpo Pamela.



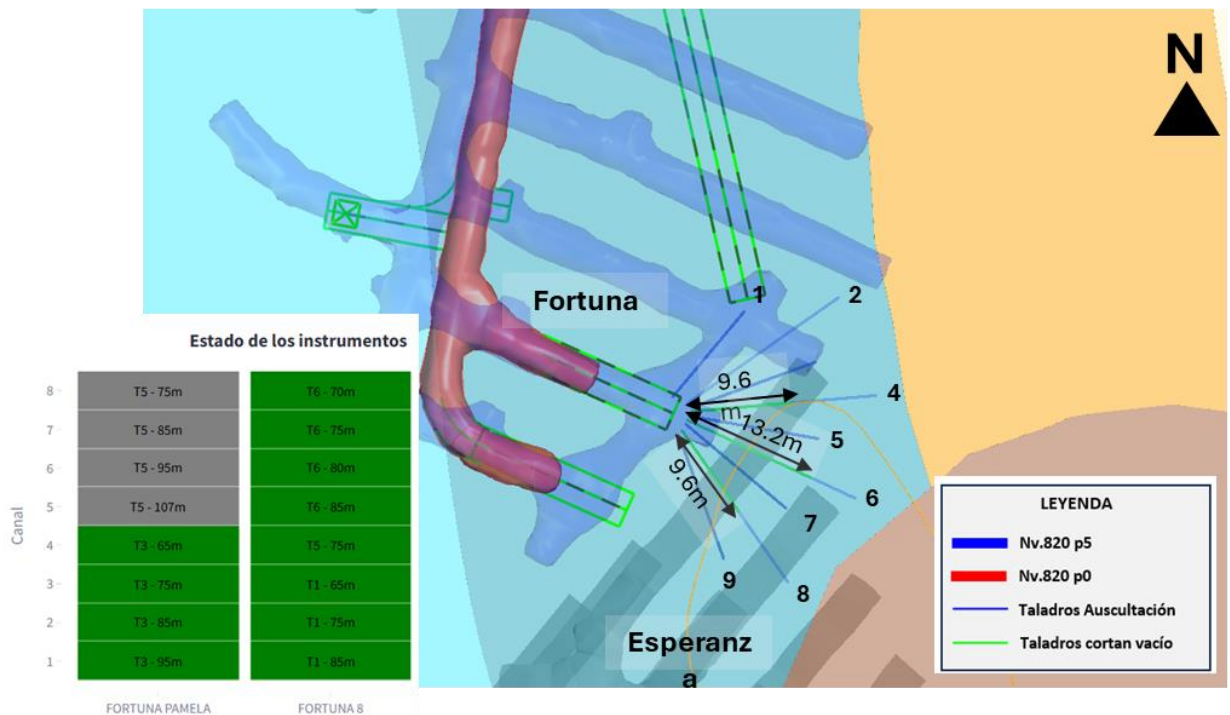
Fuente. Elaboración propia.

Figura 82. Sondajes de ubicación Fortuna Nv 820-P0 – Ventana 00



Fuente. Elaboración propia.

Figura 83. Propuesta de sondajes de auscultación hacia la zona de vacío, Fortuna Nv 820-P0 – Ventana 00



Fuente. Elaboración propia.

Gestión de riesgo 4 (vacíos) – Fortuna P

Se presenta un plano en planta Nv. 820 P.0 en la que se realizaron taladros de auscultación

a. V.-01, se realizaron 4 taladro.

Tal 4. Conecta al vacío a 8 barras(9.6m)

Tal 6. conecta el vacío 11 barras(13.2m)

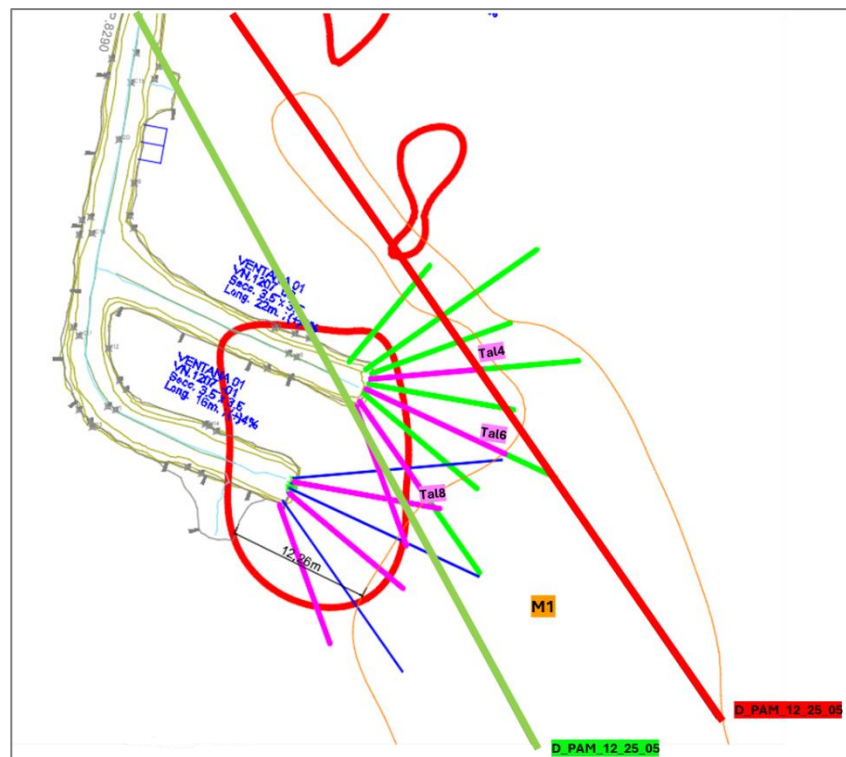
Tal 8. conecta al vacío a 8 barras(9.6m)

Tal 9. No conecta al vacío.

b. V.0, se realizaron 4 taladro no corto vacío.

Figura 84. Proyecto de sondajes de auscultación hacia la zona de vacío del M1,

Fortuna Nv 820-P0 – Ventana 00



Fuente. Elaboración propia.

4.2.9. Protocolo de Evacuación

Activación de la Alarma

El puesto de vigía está sujeto a estrictos protocolos. El operador está capacitado con procedimientos específicos reforzados con simulacros frecuentes y tener turnos con pausas activas para combatir la fatiga. El "Push Button" debe ser de tipo palm-button o hongo (para fácil activación incluso bajo estrés), de color rojo, y debe probarse diariamente para verificar su funcionamiento.

Respuesta a la Emergencia

La alarma es insonorizada con un patrón de sonido único y una luz estroboscópica que se activa con el led del tablero indicador de rotura ante un eventual corte del cable.

El personal se encuentra capacitado para evacuar y dirigirse al punto de reunión (cámara de Vigía) como punto de concentración para la reunión de todo el personal que labora en la zona de influencia del cable geocentinel. Este punto de reunión o cámara de vigía se una zona segura que se encuentra bien iluminada, ventilada, con vías de escape claras y alejado de la subsidencia. El personal debe conocer al menos dos rutas de escape diferentes para llegar a él.

4.2.10. Comunicación de la emergencia

La activación de un módulo LED en un tablero electrónico es la forma que tiene el sistema de indicar una anomalía, un cambio de estado o una alarma que requiere atención. Esta señal luminosa estroboscópica es el inicio de una cadena de respuestas.

Por lo tanto, el vigía que identifique un módulo en estado de "activado" (luz estroboscópica parpadeante) tiene la responsabilidad primordial de presionar el push botón para la activación de la sirena reportando de forma inmediata a la sala de control

mencionando la hora del evento. La notificación debe hacerse sin demora a la sala de control, que es el centro neurálgico para la gestión de incidentes.

Gestión Centralizada de la Crisis

La sala de control recibe la alarma y coordina con las áreas correspondientes. Superintendencia de Mina, Geomecánica y Planeamiento, para su intervención rápida. Ver anexo. N°02.

Toma de Decisión Informada

La inspección liderada por Geomecánica en conjunto con las áreas de Seguridad, Mina y planeamiento realizan la evaluación visual de acuerdo a la interpretación del sistema de instrumentación geocentinela modelado la nueva geometría de la cavidad (incremento de la subsidencia). Estas inspecciones se realizan de forma visual por el equipo multidisciplinario emitiendo un informe técnico para retomar las operaciones de explotación o paralizarlo de forma definitiva.

4.3. Prueba de hipótesis

Se planteó la siguiente hipótesis. “Si se implementa el sistema geocentinela entonces se podrá determinar el monitoreo del sill pillar del cuerpo Pamela, mediante la instalación e instrumentación geotécnica, que facilita considerar medidas efectivas en el control del minado del Cuerpo Pamela en la UM Yauricocha”. Tal, como se muestra en los resultados y discusión sobre la implementación del sistema geocentinela, se obtiene el resultado a través de la perforación de taladros con instrumentación geotécnica e instalación geoCentinela en el cuerpo Pamela y con el sistema de monitoreo en el sill pilar mediante los sensores se logra cuantificar los desplazamientos y detectar las zonas de fracturamiento progresivo validando el factor de seguridad

mayor a 1.5, controlando la estabilidad del macizo rocoso en la variación de tensiones internas del sill pilar.

4.3.1. Validación de hipótesis N° 01

La primera hipótesis específica plantea. “Si se determina la implementación del Sistema Centinela entonces se plantea una metodología de instrumentación en el cuerpo Pamela en la UM Yauricocha.”. La implementación del sistema geocentinela consiste en sensores geotécnicos y plataforma de análisis centinela con software; a través de la caracterización geotécnica, diseño de malla de instrumentación, la instalación y calibración, y análisis operativo; todo ello validado con criterios como. RMR, Q-System y Hoek-Brown. Para la presentación en el campo, se realiza a través de planos (figuras) donde se determina en primer lugar la ubicación de taladros y su instalación, mediante el proyecto de perforación mediante el plan de monitoreo Nv. 820 P.05 Pamela-Vacios, instrumentación geotécnica donde se programó dos taladros para identificar el M1, con las condiciones geotécnicas Nv. 820 P.11 Fortuna Pamela. También se presenta la instalación de geocentinela-Fortuna Nv.820 P5. Asimismo se menciona las litologías de rocas donde se ejecuta la perforación y los parámetros geomecánicos.

4.3.2. Validación de hipótesis N° 2

La segunda hipótesis específica plantea. “Si se realiza el monitoreo del comportamiento geomecánico del sill pilar al desplazamiento o desprendimiento del mismo, entonces se evalúa el control del minado del Cuerpo Pamela en la UM Yauricocha.”. Es un sistema tecnológico de monitoreo geotécnico que integra sensores, redes de transmisión digital, inteligencia analítica y software especializado. Su función principal es registrar, procesar e interpretar la información proveniente del macizo rocoso mediante múltiples variables geomecánicas. El monitoreo del Sistema

Geocentinela en estos pilares ha permitido establecer un control predictivo de las tensiones y deformaciones, garantizando operaciones seguras y sostenibles; donde el sill pillar, debido a su rol estructural en el sistema de excavaciones, es una unidad geomecánica de máxima prioridad para monitoreo, también el uso del equipo Geocentinela en sill pillar ofrece impactos directos como. seguridad personal, optimización económica, mayor vida útil y automatización del control geomecánico. Siendo, la función principal del monitoreo del Sistema Geocentinela de sostener los niveles superiores, evitar colapsos progresivos y mantener continuidad de minado. A través de planos (figuras) en planta y secciones del Nv. 820 P5 Pamela y sus condiciones geotécnicas Se tiene proyectado. el M1 a los 11m del tope de la V.-01, el M1 a los 4m del tope de la V.0, el M1 a 2m hacia la derecha del tope V.01. Siendo sus riesgos geotécnicos. Hundimiento local (colapso del sill pillar), propagación del cono de subsidencia, aumento en la inestabilidad en las labores aledañas, generación de mayor altura del caving (hundimiento) y propagación de esfuerzos (eventos microsísmicos en áreas cercanas); Aquí se interpreta el comportamiento del sill pilar. Cuando es de color Verde. $FS > 1.5$ deformación estable, Amarillo. $FS 1.3-1.5$ aumento de microsismicidad, Naranja. $FS 1.1-1.3$ deformación acelerada, Rojo. $FS < 1.1$ riesgo de falla. Con ello se considera las decisiones operacionales como ajuste de secuencia. postergar cortes en niveles superiores, cambiar dirección del avance, minimizar presiones de voladura; y el sostenimiento el empleo de cable bolts en coronas de pilar.

4.4. Discusión de resultados

En relación con el título de la investigación realizada “Implementación del Sistema Geocentinela para el Monitoreo del sill pillar del cuerpo Pamela en la Unidad Minera Yauricocha 2025 ” Los resultados que se han logrado y los que se vienen realizando son satisfactorios tanto en el control de la estabilidad de los pilares y de los

sills; se puede notar resultados significativos, desde el punto de vista. disminución de los incidentes geomecánicos en zonas de sill pillar, Mayor predictibilidad en explotaciones de alto tonelaje, extensión de vida útil de pilares entre 12–36 meses, mayor optimización en diseño de pilares con factor de seguridad mayor a 1.5. En cuanto se refiere a los resultados obtenidos del monitoreo continuo mediante el Sistema Geocentinela evidencian que el sill pillar presenta un comportamiento progresivo típico de macizos sometidos a redistribución de esfuerzos en minería profunda, concentración de esfuerzos alrededor del sill pillar, Formación de zona plástica en el techo y piso y deformaciones progresivas compatibles con instrumentación. En la correlación Instrumentación – Modelo Numérico, el modelo numérico calibrado indicó factores de seguridad (FS) entre 1.25 y 1.50 en etapas normales de operación, disminuyendo hasta 1.15–1.20 durante secuencias de minado simultáneo superior e inferior. En el impacto de la gestión Operacional, la discusión de resultados evidencia que el Sistema Geocentinela permitió. Ajustar secuencias de minado antes de alcanzar estado crítico, implementar sostenimiento adicional oportunamente, restringir accesos en periodos de alta actividad sísmica, ajustar secuencias de minado antes de alcanzar estado crítico, reducir eventos geomecánicos mayores en aproximadamente 30–40%. Desde un enfoque investigativo, los resultados permiten concluir que. La integración de monitoreo instrumental más la modelación numérica mejora significativamente la predictibilidad, el sistema permite detectar precursores de falla con días de anticipación. la correlación sísmica–deformacional es clave en minería profunda. Asimismo, Los resultados obtenidos en Yauricocha confirman que. el sill pillar actúa como elemento de absorción y redistribución tensional, el daño progresivo es controlable si se monitorea en tiempo real y la estabilidad no depende solo del diseño geométrico, sino del seguimiento continuo. Tal como considera Delgadillo A. (2015) que, la

instrumentación es la técnica que proporciona al ingeniero información cuantitativa y cualitativa para permitirle adecuar y balancear los diseños geotécnicos de manera racional, obteniendo tanto seguridad como eficiencia, por lo que se le reconoce una gran utilidad ya que ayuda a detectar anomalías que existan o se desarrollen en otras partes de la obra.

CONCLUSIONES

1. El Sistema Geocentinela aplicado a un sill pillar constituye una herramienta indispensable en minería subterránea moderna. Su capacidad para integrar instrumentación avanzada, análisis en tiempo real y modelos predictivos permite gestionar de manera proactiva la estabilidad del macizo rocoso. Esto se traduce en seguridad, eficiencia y sostenibilidad de las operaciones mineras.
2. La aplicación del Sistema Geocentinela en los sill pillar de Yauricocha representa uno de los avances más importantes en gestión geomecánica predictiva. Su integración con modelos numéricos calibrados y mediciones en tiempo real permite.
 - Detectar fallas antes de que se manifiesten.
 - Optimizar la explotación sin comprometer la seguridad.
 - Extender la vida de pilares.
 - Reducir costos operativos.
3. La implementación del Sistema Geocentinela permitió validar un enfoque de monitoreo predictivo basado en la integración de instrumentación geotécnica. La correlación observada entre deformaciones registradas y reducción progresiva del factor de seguridad evidenció la capacidad del sistema para anticipar condiciones críticas antes de la ocurrencia de fallas estructurales.
4. Se identificó concentración tensional en los bordes del pilar y desarrollo gradual de zonas plásticas, sin que se produjera colapso global, lo cual confirma que la estabilidad puede mantenerse bajo un esquema de monitoreo continuo y control operacional adecuado.

5. La aplicación del sistema contribuyó a optimizar la gestión del riesgo geomecánico, al facilitar ajustes oportunos en la secuencia de explotación, implementación de refuerzos adicionales y restricciones operativas en zonas críticas.
6. Desde una perspectiva científica y técnica, el estudio confirma que la integración de monitoreo instrumental en tiempo real, análisis sísmico y modelación numérica constituye una metodología importante para el control de pilares críticos en minería subterránea profunda.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda mantener y fortalecer el sistema de monitoreo geomecánico en tiempo real, asegurando la continuidad operativa de extensómetros multipunto, estaciones de convergencia y sistema micro sísmico. La confiabilidad del análisis predictivo depende directamente de la calidad, frecuencia y calibración de los datos adquiridos.
2. Es necesario realizar recalibraciones sistemáticas del modelo geomecánico conforme avance la secuencia de minado y cambien las condiciones tensionales. La actualización debe considerar nuevos parámetros geomecánicos, resultados de ensayos de laboratorio y retro análisis de eventos registrados, con el fin de mantener la precisión en la estimación del factor de seguridad.
3. Se recomienda que las decisiones relacionadas con la extracción cercana al sill pillar se basen en análisis derivados del sistema predictivo. La planificación minera debe incorporar escenarios de simulación que permitan anticipar redistribuciones de esfuerzos y evitar concentraciones tensionales excesivas.
4. En sectores donde se identifique desarrollo progresivo de zonas plásticas o incremento significativo de deformaciones, se recomienda implementar refuerzos adicionales (cables de bolting, shotcrete pesado, entre otros), priorizando un enfoque preventivo antes que correctivo.
5. Se sugiere que el Sistema Geocentinel se articule formalmente con el sistema de gestión de seguridad y salud ocupacional de la unidad minera, estableciendo protocolos de alerta temprana, niveles de criticidad y procedimientos de evacuación.
6. Es fundamental fortalecer la capacitación continua del equipo de geomecánica en interpretación de datos instrumentales, análisis sísmico y modelación numérica avanzada, con el fin de garantizar una correcta toma de decisiones basada en evidencia científica.

REFERENCIA BIBLIOGRAFICA

- B. H. G. Brady y E. T. Brown (1985). *Rock Mechanics for Underground Mining, Thrid Edition*. Kluwer Academic Publishers.
- Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre (2004). *3D large scale physical modelling for studying interactive drawing and drawpoint spacing in Block Caving Mines*. University of Queensland.
- 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*.
- D.H. Laubscher (1994). *Cave Mining-The State Of The Art. The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*.
- R.L castro, R. Vargas y F, de la Huerta, 2012. *Determination of Drawpoint spacing in panel caving. A case study an the El Teniente Mine*.
- Barton, N. (1992- 1993). *Predicting the behavior of underground openings in rock*. New Delhi.
- Bateman, Alan. (1 959). *Yacimientos Minerales de Rendimiento Económico*. Madrid, España. Ed. Omega.
- Bieniawski Z.T. (1989). *“Engineering Rock Mass Clasification” Wiley – Interscience Publication*.
- Bustillos, M & López J., C. (1990). *“Manual de Evaluación y Diseño de Explotaciones Mineras”*, Entorno Gráfico S. L. Madrid, España 705 pp.
- Meza R (2024). *Implementación del sistema de monitoreo geotécnico para evaluar el comportamiento de la subsidencia en el método de explotación Sublevel Caving en la Unidad Minera Yauricocha 2024*.
- E-Mining Tecnology (2025), *Informe Técnico Ingeniería Geotécnica, Proyecto de Profundización SLC Mina Yauricocha*.

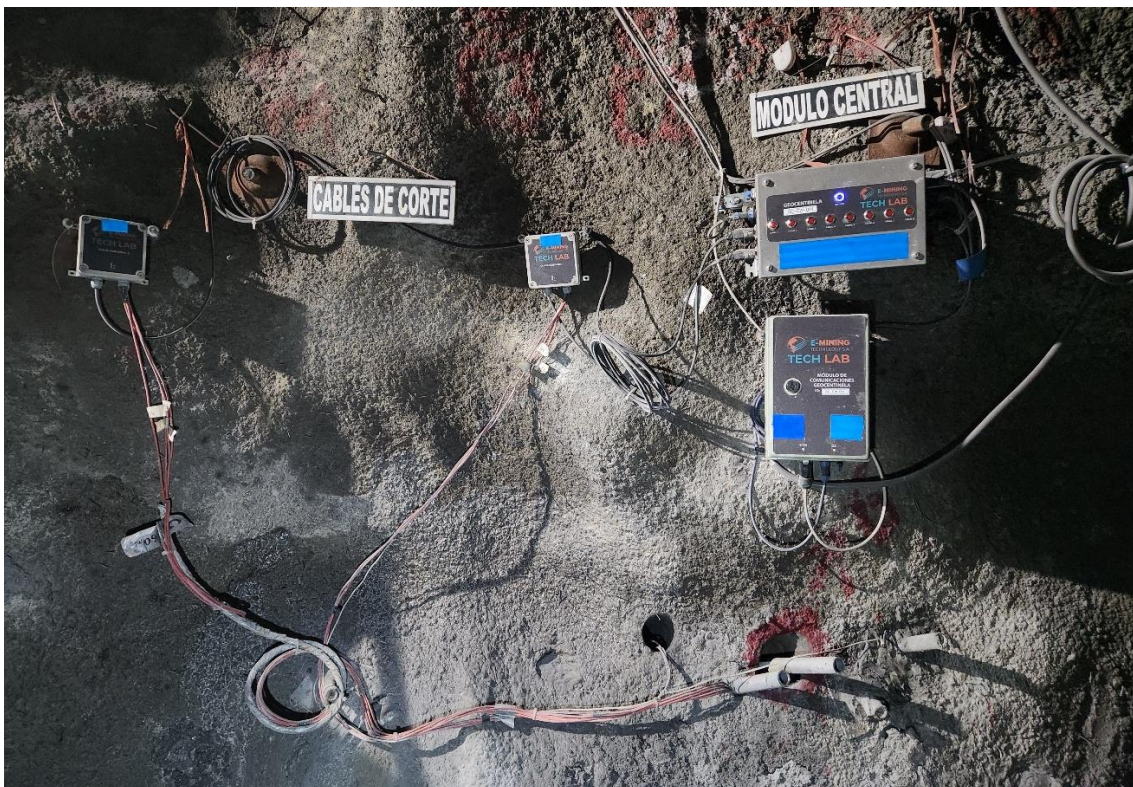
- DCR Ingenieros S.R.Ltda. (2019). *Actualización del estudio de subsidencia en mina Yauricocha. Lima*. DCR Ingenieros S.R.Ltda.
- Castro A. Et al (2019). *Diseño geotécnico de pilares en minas subterráneas de vetas auríferas en casos de Colombia*. Universidad de Colombia.
- Castillo O. (2019), *Diseño de un modelo de negocio para un instrumento escáner láser de monitoreo geotécnico*. Universidad de Chile.
- Córdova Rojas, D. (2011). *Técnicas Geomecánicas Básicas para Evaluación de la Estabilidad de Excavaciones Rocosas Subterráneas*. Mina Uchucchacua, Perú.
- Cuervas, J. (2015), *Evaluación de la estabilidad de excavaciones mineras de pequeño diámetro mediante clasificaciones geomecánicas y análisis empíricos. el caso de la mina de San Juan*, Ecuador. España.
- Condori, N. (2017). “*Evaluación geomecánica y estabilidad de labores en el proyecto San Gabriel CIA de minas Buenaventura*”. Puno-Perú.
- De La Rosa, L. (2015), *Caracterización geomecánica del macizo rocoso de rampa Laboreo Oeste de Mina Alto de la Blenda para determinar la estabilidad y necesidad de sostenimiento de la Labor*.
- Delgadillo, A. (2015), *Proceso de Monitoreo de Estructuras a través de Inclonometría Profunda*. Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga Perú.
- Diederichs, M. & Kaiser, P. (1996). *Rock Instability and Risk Analyses in Open Stope Mine Design*. Canada, Geotech.
- Hoek, E. (1999). *Strength of rocks and rock masses*. *ISRM New Journal* 5 (2), pg 12-26. Bath, C., y S. Duda.1968. *Secular Seismic Energy release in the circum pacific belt*.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., & Corkum, B. (2002). *Hoek–Brown criterion 2002 Edition. Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium*.

- Lopez M. (2014). *Estudio de instrumentación y monitoreo geotécnico - estructural en piques circulares durante la construcción de la línea 3 del metro de Santiago Chile.*
- Potvin, Y. (1993). *Review of Pillar Design and Analysis Methods. Proceedings of the Intersociety Conference on Stability of Underground Structures in Soft Ground.*
- Quispe J. (2023). *Análisis geomecánico para determinar la estabilidad del pique central y pique mascota en la mina Yauricocha. Perú.*
- Zhang, L., & Zhang, X. (2016). *Application of Real-Time Monitoring Systems for Rock Mass Stability in Deep Mining. International Journal of Mining Science and Technology, 26(1), 15–24.*
- Zhu, R., & Zhou, Y. (2019). *Real-Time Rock Mass Monitoring Using Integrated Geotechnical Sensors. Sensors (Basel), 19(6), 1350.*

ANEXOS

ANEXO A. Instrumento de recolección de datos

Vista panorámica del sistema de instrumentación Geocentinela



Componentes del sistema de instrumentación Geocentinela



Luz estroboscópica, se activa al romperse el cable del geocentinela al interior del taladro.



Caja con punto conector, donde llegan los cables provenientes del taladro.



Geocentinela con sistema de luz led que se activan al cortarse cable(s) al interior del taladro.



Módulo de comunicación, recibe la señal del geocentinela retransmitiéndolo al tablero informático que a su vez envía alerta a la cámara del vigía, oficina de geomecánica y centro de control a través de la fibra óptica.



Sirena, emite sonido de advertencia encima de los 95dB al cortarse cable al interior del taladro

Sistema de cableado del Geocentinela, identificando cada sensor de cable con su longitud respectiva



Ventana de extracción, primer disparo realizado para minado por el método de Sub Level Caving (V_1)



Ventana de explotación en proceso de minado por el método de Sub Level Caving (V_0); al piso se observa el mineral.



ANEXO B. Protocolo de evacuación



PROTOCOLO DE EVACUACIÓN



Recuerda los seis pasos que se deben seguir en caso de corte del cable de Geocentinela - Fortuna

El cable de geocentinela se monitorea de dos maneras:

1.1. Visual:

1.1.1. En centro de control (software de monitoreo E-Mining)

1.1.2. Cámara de vigía (vigilancia de cámaras).

1.2. Sonora: Mediante la detección del sonido emitido por la sirena en la labor (CM.8289_07). Sonido limitado de 10m.



Si el cable se rompe se presionará el Push Button en 2 situaciones:

2.1. Centro de control: Visualizará en el software el cambio de color de verde a rojo e informará la vigía.

2.2. Vigía: Visualizará por la cámara que la circulina se enciende y presionará el Push Button.



Centro de control



Vigía

El personal debe evacuar hacia el punto de vigía en los siguientes casos:

3.1. Al sonar la alarma (Push Button).

3.2. Al escuchar la sirena del equipo geocentinela que está ubicado en la CM.8289_07.



4

El personal capacitado de Centro de Control y/o Geomecánica debe identificar el módulo activado y su ubicación.



5

Centro de control y/o Geomecánica evalúa la situación y coordina con las áreas: Superintendencia de Mina, Geomecánica y Planeamiento para su intervención rápida.



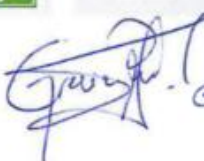
6

Las áreas encargadas deben realizar una inspección multidisciplinaria evaluando los riesgos y controles para decidir si se continua con la operación.





A. Rios centro de Control.



G. Rios CENTRO DE CONTROL



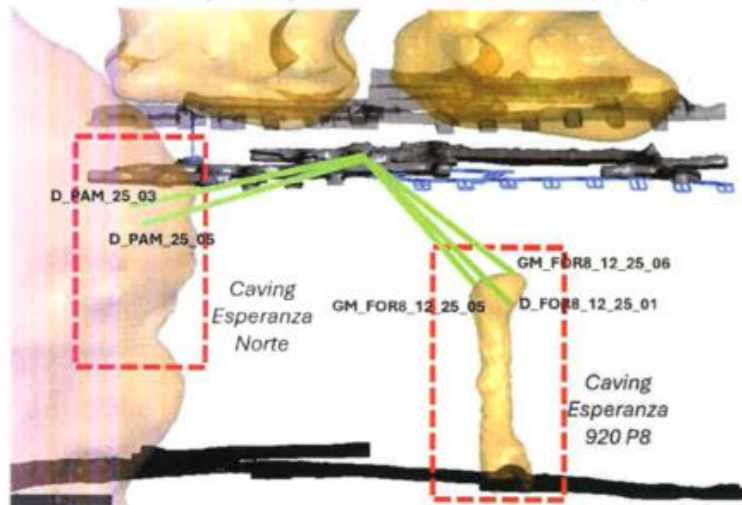
PROTOCOLO DE EVACUACIÓN

Monitoreo de Sill Pillar con Geocintinelas de Corte

Zonas de Monitoreo



• GESTIÓN DE RIESGO (VACÍOS) – FORTUNA PAMELA Y FORTUNA 8



• TARP

TRIGGER ACTION RESPONSE PLAN

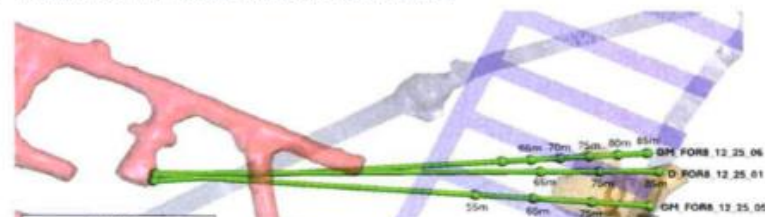
- **RIESGO BAJO:** Continuar con las actividades con normalidad.
- **RIESGO ALTO:** Evacuar al personal de la zona de influencia de vacíos.

Sup. Seguridad
Sup. Geología
Sup. Zona

• TALADROS INSTRUMENTADOS FORTUNA P



• TALADROS INSTRUMENTADOS FORTUNA 8



LEYENDA

- Nv. 920 p8 Esperanza
- Subsistencia M1
- Proyecto Ventanas P8
- Piso Actual en preparación
- Taladro instrumentado

Sup. Zona
Sup. Geología
Sup. Seguridad
Sup. Ventación
J. Zona

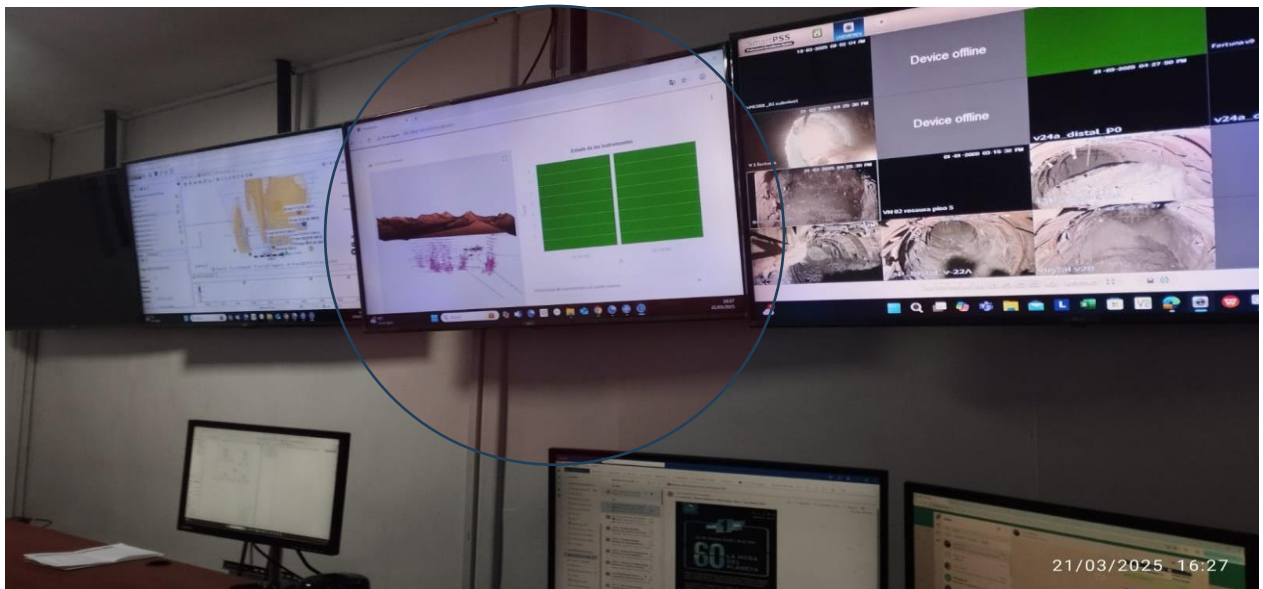
Fuente: Información Oficina Geomecánica Unidad Yauricocha

ANEXO C. Evidencia fotográficas trabajos de campo

Capacitación en campo al personal vigía y trabajadores Nv 820 – P0 Cuerpo Pamela



Centro de control, el monitor de en medio muestra la vigilancia constante del sistema Geocentinela



ANEXO D. Matriz de consistencia

MATRIZ DE CONSISTENCIA						
TÍTULO. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA GEOCENTINELA PARA EL MONITOREO DEL SILL PILLAR DEL CUERPO PAMELA EN LA UNIDAD MINERA YAURICOCHA 2024. Tesista. Bach. Chavez Javier Fernando						
PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	TIPO Y NIVEL DE INVEST
GENERAL. ¿Cómo se implementa el sistema Centinela, para el monitoreo del sill pillar en el control de minado del Cuerpo Pamela en la UM Yauricocha? Problemas específicos A. ¿Cómo se determina la implementación del Sistema Centinela en el planteamiento de una metodología de instrumentación en el cuerpo Pamela en la UM Yauricocha ? B. ¿Cómo se realiza el monitoreo para el comportamiento geomecánico del sill pillar al desplazamiento o desprendimiento del mismo, en el control del minado del Cuerpo Pamela en la UM Yauricocha ?	GENERAL. Implementar el sistema Centinela, para el monitoreo del sill pillar en el control de minado del cuerpo Cuerpo Pamela en la UM Yauricocha. Objetivos específicos A. Determinar la implementación del Sistema Centinela en el planteamiento de una metodología de instrumentación en el cuerpo Pamela en la UM Yauricocha. B. Realizar el monitoreo para el comportamiento geomecánico del sill pillar al desplazamiento o desprendimiento del mismo, en el control del minado del Cuerpo Pamela en la UM Yauricocha.	GENERAL Si se implementa el sistema geocentinela entonces se podrá determinar el monitoreo del sill pillar mediante modelamiento numérico in situ, que facilita considerar medidas efectivas en el control del minado del Cuerpo Pamela en la UM Yauricocha. Hipótesis específicas A. Si se determina la implementación del Sistema Centinela entonces se plantea una metodología de instrumentación en el cuerpo Pamela en la UM Yauricocha. B. Si se realiza el monitoreo del comportamiento geomecánico del sill pillar al desplazamiento o desprendimiento del mismo, entonces se evalúa el control del minado del Cuerpo Pamela en la UM Yauricocha.	INDEPENDIENTE X. Implementación del sistema Geocentinela. DEPENDIENTE Y. Monitoreo del Sill del Cuerpo Pamela	X1= Implementación de protocolos de actuación en respuesta a las desviaciones detectadas en el cable sensor del Geocentinela. X2= Tiempo de operación del sistema de monitoreo Geocentinela implementado en el Cuerpo Pamela Esperanza, Mina Yauricocha Y1= Monitoreo de las variaciones de longitud del cable del geocentinela instalado en el Cuerpo Pamela de la Unidad Minera Yauricocha. Y2= Esfuerzos generados en el macizo rocoso como consecuencia del método de explotación minera empleado.	X1 = Rangos de criticidad (adimensional). X2 = Tiempo de monitoreo hasta la variación de la longitud del cable (horas, días). Y1 = Longitud del Cable Geocentinela (en metros). Y2 = Esfuerzos inducidos (Mpa).	TIPO. Aplicada. NIVEL. Evaluativa.

Fuente. Catálogo Geocenela