

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGÍA Y
CIVIL**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



TESIS:

“Mejora en el proceso de recuperación de relleno por el método Sublevel Stopping mediante el Bypass 244 SE paralelo a la estructura mineralizada para optimizar la recuperación de mineral - Unidad Minera Sierra Antapite, 2025”

Para optar el título profesional de:

INGENIERO DE MINAS

PRESENTADO POR:

Bach. Juan Carlos AYALA VIZCARRA

ASESOR:

MBA. Ing. Leonil Fernando QUISPE ARONÉS

AYACUCHO - PERÚ

2026

DEDICATORIA

A Dios, por su bendición y permitirme llegar a estas instancias.

A papá y mamá, por su ejemplo de vida y por inculcarme valores para formarme como persona de bien en la sociedad.

A mi hijo, que se convirtió en mi fuente de valor, constancia y motivación.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, quiero agradecer la oportunidad brindada al Ing. Carlos Bautista por la confianza, al Ing. Mauser Laurente por los consejos brindados a lo largo de todo este tiempo.

A mis profesores de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas y a mi alma mater Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga quienes con su experiencia y dedicación lograron inculcar esa curiosidad de seguir adelante en los estudios de minería.

A todos ellos mi reconocimiento y mi gratitud.

RESUMEN

La presente investigación titulada “Mejora en el proceso de recuperación de relleno por el método Sublevel Stopping mediante el bypass 244 SE paralelo a la estructura mineralizada para optimizar la recuperación de mineral – Unidad Minera Sierra Antapite, 2025” tiene como objetivo optimizar la recuperación de mineral a través del rediseño técnico y operativo del proceso de recuperación del relleno en zonas de explotación con geometría compleja. El estudio se desarrolló en la zona denominada Zorro Rojo, específicamente en el Bypass 244 SE de la Unidad Minera Sierra Antapite, donde se identificaron limitaciones en la secuencia de minado y control de relleno, que generaban pérdidas metálicas y aumento de dilución. Se aplicó un diseño de investigación cuasi-experimental de tipo longitudinal, comparando los indicadores antes y después de la mejora. Los principales resultados demostraron un incremento de la recuperación diaria de mineral en 48.40 %, un aumento de la ley del mineral en 28.99 %, una reducción de la dilución en 37.08 % y una disminución del costo unitario en 17.24 %. La implementación del bypass paralelo a la estructura permitió una mejor conectividad, mayor estabilidad geomecánica y continuidad en la extracción, consolidando un modelo de recuperación más eficiente y rentable, aplicable a otras áreas con condiciones geológicas similares.

Palabras clave: Recuperación de relleno – Sublevel Stopping – Bypass 244 SE.

ABSTRACT

his research, entitled “Improvement of the Backfill Recovery Process through the Sublevel Stopping Method Using the 244 SE Bypass Parallel to the Mineralized Structure to Optimize Ore Recovery – Sierra Antapite Mining Unit”, aims to optimize ore recovery through the technical and operational redesign of the backfill recovery process in zones with complex geometry. The study was conducted in sector 244 SE of the Sierra Antapite Mining Unit, where deficiencies in the mining sequence and backfill control were identified, leading to metal losses and increased dilution. A longitudinal quasi-experimental design was applied, comparing operational indicators before and after the improvement. The main results demonstrated a 48.40% increase in daily ore recovery, a 28.99% increase in ore grade, a 37.08% reduction in dilution, and a 17.24% decrease in unit cost. The implementation of the bypass parallel to the mineralized structure enhanced connectivity, geomechanical stability, and extraction continuity, resulting in a more efficient and profitable recovery process that can be replicated in other areas with similar geological conditions.

Keywords: Backfill recovery – Sublevel Stopping 244 SE Bypass.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTO	ii
RESUMEN	iii
ABSTRACT.....	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO	v
INDICE DE TABLAS	xi
INDICE DE FIGURAS.....	xii
INTRODUCCIÓN	xiii
CAPITULO I ASPECTOS GENERALES	1
1.1 Planteamiento del Problema.....	1
1.2 Preguntas de Investigación.....	2
1.2.1 Problema General	2
1.2.2 Problemas específicos	2
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo General	3
1.3.2 Objetivos Específicos	3
1.4 Justificación e Importancia.....	4

CAPÍTULO II MARCO TEORICO	6
2.1 Antecedentes	6
2.1.1 Antecedentes internacionales	6
2.1.2 Antecedentes nacionales	8
2.2 Generalidades	9
2.2.1 Ubicación y Accesibilidad.....	9
2.2.2 Fisiografía.....	12
2.2.3 Suelos	12
2.2.4 Climatología.	13
2.2.5 Medio Ambiente Biológico.	14
2.2.6 Índice de Desarrollo Humano:.....	16
2.3 Marco teórico	17
2.3.1 Perforación y Voladura en Minería	17
2.3.2 Fragmentación del Material y su Impacto en la Operación.....	18
2.3.3 Optimización de Parámetros de Perforación y Voladura	20
2.3.4 Costos Operativos Asociados a la Fragmentación y Voladuras Secundarias..	21
2.3.5 Seguridad en las Operaciones de Voladura	23
2.4 Definiciones conceptuales.....	24
2.4.1 Parada por niveles.....	24
2.4.2 Recuperación del relleno	25

2.4.3	Relleno cementado	25
2.4.4	Estructura geológica	25
2.4.5	Dilución minera	25
2.4.6	Estabilidad del macizo rocoso	26
2.4.7	Secuencia de minado	26
2.4.8	Recuperación de mineral	26
2.4.9	Diseño de cámaras y pilares	26
2.4.10	Fragmentación del macizo.....	27
2.4.11	Desarrollo horizontal	27
2.4.12	Malla de perforación.....	27
2.4.13	Sostenimiento temporal y permanente	27
2.4.14	Ciclo de minado.....	27
2.4.15	Voladura controlada	28
2.4.16	Macizo rocoso competente	28
2.4.17	Ley de mineral	28
2.4.18	Método paralelo a la estructura	28
2.4.19	Eficiencia operativa	29
2.4.20	Gestión minera sostenible.....	29
CAPITULO III METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN		30
3.1	Marco Metodológico	30

3.1.1	Tipo de investigación.....	30
3.1.2	Nivel de investigación	30
3.1.3	Diseño de investigación.....	30
3.2	Hipótesis.....	31
3.2.1	Hipótesis general	31
3.2.2	Formulación de hipótesis específicas	31
3.3	Variables e indicadores	32
3.3.1	Operacionalización de variables	32
3.3.2	Variable independiente	32
3.3.3	Variable dependiente	33
3.3.4	Instrumentos	33
3.3.5	Técnicas de procesamiento y análisis de datos.....	33
CAPITULO IV RESULTADOS Y DISCUSIONES.....		34
4.1.	Resultados	34
3.4	Procedimiento de la implementación de cuadros en ventanas para cruzar la estructura mineralizada en el bypass 244 SE	36
3.4.1	Diagnóstico técnico y geomecánico inicial	37
3.4.2	Diseño técnico del bypass paralelo.....	37
3.4.3	Ejecución del desarrollo del bypass	38
3.4.4	Conexión operativa con cámaras y rellenos existentes	39

3.4.5	Monitoreo, evaluación y validación de resultados	39
3.4.6	Conclusión del procedimiento	40
3.5	Resultados de la Implementación de cuadros en ventanas para cruzar la estructura mineralizada en el Bypass 244 SE.....	42
3.5.1	Incremento de la productividad (Toneladas por día – TPD)	42
3.5.2	Mejora en la ley del mineral (g/t Au)	42
3.5.3	Reducción significativa de la dilución (%)	43
3.5.4	Disminución del costo unitario (USD/T)	43
3.5.5	Impacto técnico y geomecánico	43
3.5.6	Conclusión de los resultados	44
3.5.7	Comentario del Gráfico: Promedio de TPD – Segundo y Tercer Trimestre ...	53
3.5.8	Comentario del Gráfico: Promedio de Ley – Segundo y Tercer Trimestre	55
3.5.9	Comentario del Gráfico: Promedio de Dilución – Segundo y Tercer Trimestre	
	56	
3.5.10	Comentario del Gráfico: Promedio de Costo Unitario (USD/T) – Segundo y Tercer Trimestre	58
3.5.11	Resultado: tpd – Toneladas por día de extracción de mineral	59
3.5.12	Resultado: Ley (g/t Au) – ley del mineral de Au	60
3.5.13	Resultado: Dilución (%) del Mineral.....	61
3.5.14	Resultado: USD/T (Costo por tonelada recuperada)	62

3.5.15	Comentarios resultados generales	63
3.5.16	Contrastación de Hipótesis	64
3.5.17	Hipótesis general	64
3.5.18	Primera hipótesis específica	65
3.5.19	Segunda hipótesis específica	66
3.5.20	Tercera hipótesis específica.....	66
3.5.21	Conclusión de la contrastación	67
3.6	Discusiones.....	67
3.6.1	Productividad y continuidad operativa	68
3.6.2	Aumento de la ley del mineral.....	68
3.6.3	Reducción de la dilución	68
3.6.4	Eficiencia económica y reducción de costos	69
3.6.5	Estabilidad geomecánica y seguridad operacional	69
3.6.6	Impacto integral del bypass 244 SE	70
3.6.7	Conclusión de la discusión	70
CONCLUSIONES		72
RECOMENDACIONES.....		74
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....		76
MATRIZ DE CONSISTENCIA		79
ANEXOS		81

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Acceso hacia la U.E.A. Antapite	10
Tabla 2.	IDH del Distrito de Córdova – Huytará	16
Tabla 3.	Operacionalización de variables	32
Tabla 4.	Parámetros del segundo trimestre	35
Tabla 5.	Parámetros del tercer trimestre	44
Tabla 6.	Descripción de indicadores	45
Tabla 7.	Parámetros abril 2025	47
Tabla 8.	Parámetros mayo 2025	48
Tabla 9.	Parámetros junio 2025	49
Tabla 10.	Parámetros julio 2025	50
Tabla 11.	Parámetros agosto 2024	51
Tabla 12.	Parámetros septiembre 2024	52
Tabla 13.	Validación del modelo experimental	63

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 — Ubicación y accesos de la Mina Antapite	11
Figura 2 — Dato Histórico de Precipitaciones U.E.A. Antapite	14
Figura 3 — Esquema del proceso de perforación y voladura	18
Figura 4 — Relación entre tamaño de fragmentación y costos operativos.....	19
Figura 5 — Influencia del diámetro de barrenos en la fragmentación.....	21
Figura 6 — Comparación de costos operativos con y sin optimización de fragmentación	22
Figura 7 — Factores de riesgo en operaciones de voladura	24
Figura 8 — Plano del Bypass 244 SE.....	41
Figura 9 — Producción por día mensual	53
Figura 10 — Ley mensual	54
Figura 11 — Dilución mensual.....	56
Figura 12 — Costo por tonelada de extracción mensual	57
Figura 13 — Toneladas por día	59
Figura 14 — Ley por día.....	60
Figura 15 — Dilución por día.....	61
Figura 16 — Costo por tonelada de extracción por día	62

INTRODUCCIÓN

En el contexto de la minería subterránea moderna, uno de los mayores desafíos operativos consiste en maximizar la recuperación del mineral sin comprometer la estabilidad geo mecánica ni incrementar los costos de operación. Dentro de los métodos más aplicados en vetas angostas y cuerpos mineralizados con continuidad estructural, el Sublevel Stopping ha demostrado ser una alternativa eficiente; sin embargo, su desempeño depende directamente del control en la recuperación del relleno y de una adecuada planificación del ciclo de minado. En muchas operaciones, las pérdidas de mineral y el aumento de la dilución se originan por deficiencias en la secuencia de extracción, la geometría de las cámaras y la falta de conexión entre zonas de trabajo, lo que afecta la rentabilidad y sostenibilidad del proceso productivo.

En la Unidad Minera Sierra Antapite, se identificaron limitaciones en la recuperación de mineral en la zona denominada Zorro Rojo, en específico, Bypass 244 SE, donde el método Sublevel Stopping paralelo a la estructura mineralizada presentaba restricciones por la falta de continuidad operacional entre cámaras y rellenos. Ante esta problemática, se desarrolló un bypass 244 SE paralelo a la estructura mineralizada la cual se conecta a la estructura mediante ventanas. Con el propósito de mejorar la conectividad entre tajos, optimizar el flujo de mineral y lograr una recuperación más selectiva, se propuso cruzar toda la estructura mineralizada mediante cuadros y así recuperar en mayor porcentaje el mineral reduciendo al mismo tiempo la dilución y los costos por tonelada extraída.

El estudio se basa en la aplicación de un diseño de investigación cuasi-experimental de tipo longitudinal, comparando los indicadores técnicos y económicos antes y después de la mejora. Los indicadores analizados fueron toneladas por día (tpd), ley del mineral (g/t Au), dilución (%) y

costo unitario (USD/T). La información fue obtenida a partir de reportes operativos y metalúrgicos de los periodos segundo y tercer trimestre de 2025, permitiendo medir de forma cuantitativa el impacto de la mejora.

Los resultados demostraron que la implementación del bypass paralelo permitió un incremento del 48.40 % en la producción diaria, una mejora del 28.99 % en la ley del mineral, una reducción de la dilución del 37.08 % y una disminución de los costos en 17.24 %, evidenciando una mayor eficiencia operativa y económica. Además, el rediseño contribuyó a una mejor distribución de esfuerzos en el macizo rocoso, reduciendo riesgos geotécnicos y asegurando una recuperación más sostenible.

En síntesis, la presente investigación constituye un aporte técnico relevante al demostrar que la mejora en la recuperación del relleno mediante el bypass 244 SE paralelo a la estructura mineralizada no solo optimiza la recuperación de mineral, sino que también fortalece la continuidad del ciclo minero, incrementa la estabilidad de los tajos y establece una metodología replicable en otras zonas de la mina con similares características geológicas y estructurales.

CAPITULO I

ASPECTOS GENERALES

1.1 Planteamiento del Problema

En la minería subterránea, uno de los retos más frecuentes es lograr una recuperación óptima del mineral minimizando las pérdidas metálicas y controlando la dilución que se genera durante el proceso de extracción. En particular, cuando se aplican métodos como el Sublevel Stopping en estructuras mineralizadas con geometrías irregulares o zonas de baja continuidad, se presentan dificultades en el control del relleno y en la secuencia de minado, lo que afecta directamente la eficiencia y rentabilidad de la operación.

En la Unidad Minera Sierra Antapite, en la zona Zorro Rojo, específicamente en el Bypass 244 SE, se identificaron limitaciones técnicas y operativas en la recuperación del mineral producto del relleno cementado, debido a la ausencia de una conexión eficiente entre los tajos y la estructura mineralizada. Esta situación generaba una recuperación incompleta del relleno, un incremento en la dilución promedio superior al 19 % y una reducción en la ley del mineral recuperado, afectando la productividad global del proceso minero. Asimismo, la falta de continuidad geo mecánica entre cámaras dificultaba el acceso al mineral remanente, aumentando los tiempos de ciclo y los costos unitarios por tonelada extraída.

El diseño operativo inicial no contemplaba un sistema de cuadros en las ventanas que conectara los niveles y cámaras de explotación paralelas a la estructura mineralizada, limitando la selectividad y la recuperación total del mineral. La falta de un canal de extracción complementario

ocasionaba que parte del relleno útil quedara inaccesible o fuera removido sin control, reduciendo el factor de recuperación y comprometiendo la estabilidad local del macizo rocoso.

Frente a esta problemática, se planteó la implementación de cuadros para cruzar toda la estructura mineralizada, orientado a mejorar la continuidad del flujo de mineral, facilitar el acceso al relleno, optimizar la secuencia de minado y reducir la dilución del material extraído. Esta mejora técnica busca evaluar en qué medida la integración de cuadros en las ventanas para cruzar la estructura mineraliza influye en los indicadores operativos: toneladas por día (tpd), ley del mineral (g/t Au), dilución (%) y costo unitario (USD/T).

1.2 Preguntas de Investigación

1.2.1 Problema General

- ¿De qué manera la mejora en el proceso de recuperación de relleno mediante el bypass 244 SE paralelo a la estructura mineralizada optimiza la recuperación de mineral en la Unidad Minera Sierra Antapite?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cuáles son las principales deficiencias técnicas y operativas en el proceso actual de recuperación del relleno en la zona Zorro Rojo, Bypass 244 SE?
- ¿Cómo influye la implementación de cuadros en las ventanas para cruzar la estructura mineralizada en la continuidad operativa, la reducción de la dilución y la estabilidad geomecánica del área de explotación?

- ¿Qué impacto tiene la mejora propuesta en la productividad, recuperación de mineral y costos unitarios del proceso minero?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Optimizar la recuperación de mineral en la Unidad Minera Sierra Antapite mediante la mejora del proceso de recuperación de relleno por el método Sublevel Stopping, implementando cuadro en las ventanas en el bypass 244 SE paralelo a la estructura mineralizada, a fin de incrementar la productividad, reducir la dilución y disminuir los costos unitarios de operación.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Diagnosticar las deficiencias técnicas y operativas del proceso actual de recuperación de relleno en la zona Zorro Rojo, Bypass 244 SE, identificando los factores que limitan la continuidad y eficiencia del método Sublevel Stopping.
- Diseñar e implementar cuadros de madera en las ventanas para cruzar toda la estructura mineralizada en el bypass 244 SE, evaluando su influencia en la conectividad entre cámaras, la estabilidad geo mecánica y la optimización del ciclo de minado y relleno.
- Comparar los indicadores operativos antes y después de la mejora —toneladas por día (tpd), ley del mineral (g/t Au), dilución (%) y costo unitario (USD/T)— para determinar el impacto técnico y económico de la implementación del bypass en la recuperación total de mineral.

1.4 Justificación e Importancia

- Justificación técnica: La implementación del método de Sublevel Stopping en paralelo a la estructura mineral presenta oportunidades significativas en cuanto a mejorar a nivel técnico, sobre todo en la recuperación de mineral asociado a rellenos cementados. La geometría del cuerpo mineralizado, la dirección de las vetas y la variabilidad del macizo rocoso, requieren de una adaptación en el diseño de cámaras y pilares, así como también de mejoras en los métodos de recuperación del relleno sin comprometer la estabilidad del entorno. La optimización de estos parámetros técnicos maximiza el contacto del mineral con sus zonas accesibles para su recuperación, como elemento clave para minimizar la dilución y aumentar el factor de recuperación (Smith & Littlejohn, 2018). Justificación desde el punto de vista operativo: desde el punto operacional, la mejora en el proceso de recuperación del relleno repercute positivamente en la continuidad del ciclo minero dado que la mejora del diseño y la mejora del proceso de recuperación permite la disminución de tiempos muertos y retrabajos por colapsos de rellenos o por pérdidas de mineral útil. También, el hecho de trabajar junto a la estructura permite la planificación en secuencia de las labores, las interferencias entre equipos se disminuyen y, por el contrario, se logra una mejor gestión del personal y recursos logísticos (Chacón et al., 2021).
- Justificación desde el punto de vista económico: desde el punto de vista económico, la mejora en el proceso de recuperación del relleno se traduce en la mejora del tonelaje útil recuperado por ciclo operativo, lo que a su vez mejora la relación costo – beneficio. Una mayor recuperación de mineral por unidad de desarrollo y menor necesidad de retrabajos reducen los costos por tonelada producida y aumentan los márgenes operativos. También

disminuyen los costos indirectos ligados a pérdidas de mineral, sobreexcavaciones y sostenimiento no planificado (Torres y Vílchez, 2022).

- Justificación de seguridad: La seguridad es un aspecto fundamental en operaciones subterráneas, la mejora de la recuperación del relleno mediante un diseño que se adecúa a la estructura permite disminuir la exposición a riesgos de colapso y de zonas inestables; así, asegurar la recuperación del relleno en etapas simultáneas y controladas reduce el riesgo para los operarios y aumenta la estabilidad del tajo. La seguridad en los procedimientos y la aplicación de tecnologías de monitoreo geotécnico garantizan las condiciones de trabajo en zonas críticas (González y Herrera, 2020).
- Justificación medioambiental y normativa: Finalmente, desde un enfoque normativo y medioambiental, la mejora del proceso de recuperación del relleno es una contribución a una minería más responsable y sostenible, dado que permite aprovechar al máximo los recursos minerales sin dejar espacios de interés económico sin explotar; además, se disminuye el volumen de residuos y se mejora la eficiencia del uso de relleno cementado, ítem que resulta esencial para alcanzar criterios normativos y medioambientales en minería subterránea (Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2021).

CAPÍTULO II

MARCO TEORICO

2.1 Antecedentes

2.1.1 Antecedentes internacionales

- Según ROJAS (2014), en su tesis "Evaluación técnica y económica de una mina subterránea utilizando relleno cementado", Santiago, autor: Fernando Adolfo Rojas Hernández, año: 2014, Universidad de Chile. Esta tesis tuvo como objetivo diseñar una operación subterránea empleando el método de sublevel stoping con relleno de relaves cementados para aumentar la recuperación de mineral, garantizar condiciones de estabilidad seguras, extender la vida útil de la mina y minimizar la subsidencia causada por la explotación. La metodología consistió en un análisis técnico-económico comparativo entre dos escenarios: sin relleno y con relleno cementado, incluyendo evaluación geomecánica del macizo rocoso. El diseño fue aplicado y cuantitativo, con datos simulados sobre reservas y ciclos de minado como muestra de análisis. En el resumen se destaca que el uso de relleno permite pasar de 3,05 a 6,68 millones de toneladas explotables, aumentando la vida útil de la mina de 7 a 11 años. Se concluye que el relleno cementado no solo incrementa la recuperación de mineral, sino que también presenta beneficios operacionales, estructurales y medioambientales.
- Según MARIQUEZ (2016) en su tesis "Desarrollo de herramientas de diseño para minería por sublevel stoping", Santiago, autor: Fernando Manríquez Carvajal, año: 2016, Universidad de Chile. Esta tesis tuvo como objetivo desarrollar herramientas de

diseño empíricas ajustadas a las condiciones locales de una mina en operación, para cuantificar su impacto económico y técnico en proyectos de explotación por sublevel stoping, incluyendo potenciales profundizaciones. La metodología combinó análisis documental, desarrollo de modelos de diseño con software minero y su validación en un caso práctico. El diseño fue aplicado, con enfoque comparativo, y se usaron datos reales de una mina chilena como muestra. En el resumen se detalla que las herramientas diseñadas permiten mayor precisión en el trazado de cámaras, mejores decisiones operativas y una estimación más eficiente de la rentabilidad. Las conclusiones indican que la propuesta mejora la planificación minera, optimiza el uso del relleno y contribuye al aprovechamiento sustentable de los recursos.

- Según DIAZ (2020), en su tesis "Evaluación de la distribución de esfuerzo en pilares para un sublevel stoping", Santiago, autor: Camila Marlenne Díaz Mella, año: 2020, Universidad de Chile. Esta tesis tuvo como objetivo analizar la distribución de esfuerzos en pilares dentro del método de explotación sublevel stoping con relleno, comparando distintos escenarios para optimizar la estabilidad de la mina. La metodología incluyó revisión de literatura técnica, modelamiento numérico con software geomecánico y simulación de esfuerzos en pilares bajo distintas condiciones. El diseño fue descriptivo y experimental, usando como muestra una unidad de explotación con geometría vetiforme en roca competentemente caracterizada. En el resumen se resalta que la presencia de relleno impacta favorablemente en la redistribución de esfuerzos, reduciendo zonas de concentración y aumentando la vida útil estructural del sistema. Se concluye que el análisis de esfuerzos es clave para

mejorar la recuperación segura de mineral, y que el diseño de pilares debe considerar el relleno como parte del sistema portante.

2.1.2 Antecedentes nacionales

- AYUQUE (2020) en su tesis "Optimización de la recuperación de mineral en el método de explotación Bench and Fill con taladros largos en la veta Magistral Centro de minera Trevali Perú – Unidad Santander", Ayuque Carrera (2020), de la Universidad Continental en Huancayo, se plantea como objetivo desarrollar una metodología que mejore la recuperación de mineral mediante el ajuste de variables operacionales como el burden y la densidad de perforación. Se utilizó una metodología cuantitativa con diseño aplicado y explicativo, analizando datos operacionales de la veta mencionada. La muestra corresponde a los informes técnicos y datos de producción del área de estudio. En su resumen, se concluye que al integrar variables adicionales en el análisis, se logra aumentar significativamente la productividad, mejorar el control de dilución y reducir los costos operativos de extracción, impactando positivamente la rentabilidad de la unidad minera.
- Según CUEVAS (2020), en su tesis "Mejora de la recuperación del mineral y control de la dilución de los métodos de minado Bench and Fill y Sublevel Stoping con taladros largos en la zona Hadas de la unidad minera Raura", elaborada en la Universidad Continental, Huancayo, tuvo como objetivo evaluar la eficacia de ambos métodos en la mejora de la recuperación y control de dilución. Empleó una metodología cuantitativa de tipo aplicada y explicativa, con análisis documental y evaluación de indicadores operativos como la recuperación y el factor de dilución. La muestra

comprendió datos operacionales del sector Hadas de la unidad minera Raura. En su conclusión, determinó que la combinación de ambos métodos con taladros largos incrementa el tonelaje producido, reduce costos y mejorar la eficiencia sin comprometer la seguridad ni la estabilidad geomecánica del tajo.

- Según BALAREZO (2022), en su tesis titulada "Diseño de explotación minera subterránea en la producción de minerales de la Empresa Minera La Escondida" fue desarrollada en 2022 en la Universidad Nacional San Luis Gonzaga (Ica) por el autor Piero Sebastian Balarezo La Rosa, bajo la asesoría de Hernan Oswaldo Canales Revatta. El objetivo de la investigación fue verificar si un diseño eficiente de explotación subterránea influye en el incremento de la producción minera. Se empleó una metodología de tipo aplicada, con un nivel descriptivo-correlacional y un diseño descriptivo explicativo, tomando como muestra las operaciones de minado de la mina La Escondida durante el año 2022. A través del análisis de datos operativos, se concluyó que la implementación del nuevo diseño incrementó la producción de minerales en un 41.86%, el avance lineal en un 58.50% y permitió una reducción de los costos operativos en un 9.71%, mejorando la eficiencia general del proceso extractivo.

2.2 Generalidades

2.2.1 Ubicación y Accesibilidad.

El distrito minero de Antapite se localiza en el flanco occidental de la Cordillera Occidental de los Andes, al sur de la provincia de Huaytará, dentro del departamento de Huancavelica. El yacimiento se encuentra en las nacientes de los ríos Ica y Grande, con

coordenadas centrales aproximadas de 8°45',733 N y 492,836 E (sistema UTM – WGS84, zona 18S) y altitudes que varían entre 3,000 y 4,100 msnm.

El acceso principal se realiza desde la ciudad de Huamanga (Vetania) o desde Ica, conectando por la Carretera Panamericana Sur (km 307) hasta el poblado de Los Aquijes, punto desde el cual parte una vía afirmada de aproximadamente 130 km que comunica las localidades de Tingue, Córdova y Antapite.

La Figura 1: Ubicación y accesos de la Mina Antapite muestra el emplazamiento político-administrativo del distrito y las distancias aproximadas de los accesos desde las principales ciudades cercanas.

Tabla 1. Acceso hacia la U.E.A. Antapite

ACCESOS A LA MINA ANTAPITE	
Lima - Ica (Los Aquijes)	308 km
Los Aquijes - Córdova	100 km
Córdova - U.E.A. Antapite	28 km
Total	436 km

Fuente: Elaboración Propia



Figura 1 — Ubicación y accesos de la Mina Antapite

Fuente: Archivo interno U.E.A. Antapite 2019 (Departamento de Geología)

2.2.2 Fisiografía.

El área del yacimiento presenta una topografía predominantemente abrupta, caracterizada por altas pendientes y profundos cauces de quebradas que fragmentan el relieve, otorgándole un aspecto irregular y de difícil acceso. Las inclinaciones de las laderas varían entre 15 % y 40 %, evidenciando un relieve fuertemente disectado. La superficie del terreno está conformada por una sucesión de colinas y quebradas estrechas, cubiertas por una vegetación escasa, compuesta principalmente por especies del género *Poa*, *Bacharis* y algunos ejemplares de *Eucalyptus*, típicos de zonas altoandinas con suelos de limitada capacidad de retención hídrica.

2.2.3 Suelos

El área de operaciones se asienta sobre suelos del tipo Córdova, los cuales presentan un perfil poco desarrollado y escasa presencia de gravas. El relieve predominante corresponde a un paisaje montañoso estructural–erosional y estructural–dislocado, con sectores de morfología glacio-fluvial, asociados a formaciones geológicas del Jurásico, Terciario y Cuaternario. Esta configuración genera una topografía predominantemente montañosa, aunque con algunas zonas suavemente onduladas.

La zona se localiza entre la parte central de la provincia de Tayacaja y el sector sur de Huaytará, dentro del departamento de Huancavelica, en áreas donde las condiciones de génesis, clima y edafología son similares, especialmente en los sectores de relieve moderado. Las pendientes varían desde 15 % hasta más de 75 %, clasificándose como moderadamente empinadas a extremadamente empinadas.

Los suelos Córdova se caracterizan por su bajo desarrollo genético, coloración marrón rojiza a rojo oscuro y textura franca, con drenaje moderado y reacción ligeramente ácida ($\text{pH} \approx 6.3$). Poseen bajo contenido de fósforo, nivel medio de potasio y una capacidad de intercambio catiónico entre 37.4 y 43.2 meq/100 g, además de una alta saturación de bases, lo que les otorga una fertilidad media y condiciones adecuadas para soportar vegetación nativa de zonas altoandinas.

2.2.4 Climatología.

El clima predominante en la zona de estudio corresponde a la región ecológica Puna, caracterizada por condiciones frías y secas propias de las zonas altoandinas. De acuerdo con los registros del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), la gradiente térmica promedio es de aproximadamente $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ por cada 100 m de altitud, lo que sitúa la temperatura media anual en torno a los $9.1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La humedad relativa promedio es inferior al 70 %, lo cual clasifica al ambiente como moderadamente seco; sin embargo, en determinados sectores y horarios se registran valores de hasta 80 %, especialmente durante las primeras horas de la mañana. En cuanto al régimen de vientos, estos siguen la dirección predominante sureste (SE), coincidiendo con la orientación de las cuencas de la vertiente del Pacífico. Las velocidades de viento varían estacionalmente: durante el mes de agosto se observan ráfagas que alcanzan los 6 m/s (equivalentes a brisas moderadas), mientras que en enero los vientos disminuyen a 2 m/s, manteniendo la misma dirección general sureste.

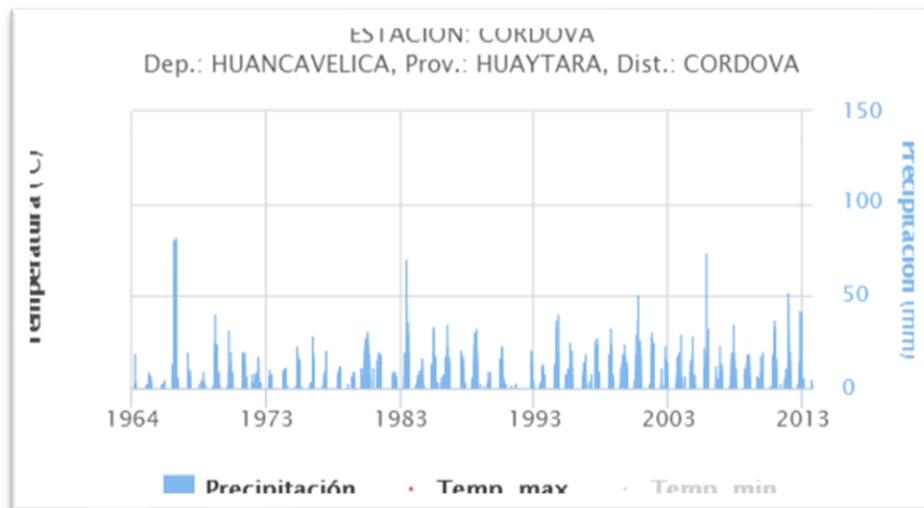


Figura 2 — Dato Histórico de Precipitaciones U.E.A. Antapite

Fuente: SENAMHI

2.2.5 Medio Ambiente Biológico.

Las formaciones vegetales identificadas en el área del proyecto corresponden principalmente a comunidades altoandinas de la región Puna, con presencia de especies herbáceas, arbustivas y matorrales adaptados a condiciones frías, de baja humedad y suelos poco desarrollados.

Estepa de gramíneas: Esta formación está dominada por especies del género *Poa*, *Festuca*, *Calamagrostis* e *Ichu* (*Stipa ichu*), típicas de pastizales de altura. Cubre aproximadamente el 8 % del área total del proyecto y se distribuye en zonas con pendientes moderadas, suelos delgados y drenaje rápido.

Matorral ralo: Corresponde a una vegetación de porte bajo, con arbustos de entre 30 y 40 cm de altura, intercalados con gramíneas dispersas. Predominan las especies *Baccharis*

latifolia y *Baccharis odonata*, adaptadas a suelos pedregosos y de escasa profundidad. Esta formación contribuye a la protección del suelo frente a la erosión eólica y pluvial.

Vegetación de rocas y pedregales: Se desarrolla sobre sustratos rocosos y suelos esqueléticos con escasa cobertura vegetal. La comunidad está conformada por arbustos resistentes a la sequía, entre ellos *Baccharis*, *Lepidophyllum* y *Ribes cuneifolius*, que prosperan en condiciones de baja disponibilidad hídrica y temperaturas extremas.

En cuanto a la fauna silvestre, la composición de especies varía según la altitud. En los sectores bajos y de media pendiente, asociados al Distrito de Córdova, se reporta la presencia de mamíferos menores como cuyes, comadreas y mulitas, así como aves y reptiles representativos como catitas verdes, jilgueros, lagartos, calandrias, palomas montaraces, tordos y murciélagos cola de ratón. También se registran anfibios como ranas y sapos comunes.

En las zonas más elevadas, el ecosistema alberga aves rapaces y de altura, tales como águilas, cóndores, halcones, jotes, chingolos y picaflones, junto con mamíferos carnívoros y herbívoros como pumas, zorros colorados, ovinos y vacunos. Esta diversidad refleja la adaptación de la fauna local a las condiciones climáticas extremas y a los gradientes altitudinales característicos de la región altoandina. Medio Ambiente Socio-Económico y Cultura

Esta formación vegetal esta reducida a parcelas cultivadas con especies de pan llevar (papa, maíz, oca, olluco, etc) y forraje principalmente. La fauna ha sido elevada mediante observación directa e indirecta (huellas, madrigueras, nidos , etc) durante los recorridos a pie

en el área del proyecto a partir de la información bibliográfica existente . Entre los vertebrados, las aves constituyen el grupo más diverso.

2.2.6 Índice de Desarrollo Humano:

El Índice de Desarrollo Humano (IDH) constituye un indicador ampliamente utilizado en las ciencias económicas y sociales, tanto a nivel nacional como internacional. Fue propuesto en el año 1989 y difundido por primera vez en el Informe Mundial sobre Desarrollo Humano de 1990, elaborado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). Desde entonces, este índice se ha mantenido como una herramienta fundamental para evaluar el progreso de los países en función de tres dimensiones esenciales: salud, educación y nivel de vida.

Tabla 2. IDH del Distrito de Córdova – Huaytará

Provincia	Población	Índice de Desarrollo Humano	Esperanza de vida al nacer	Población con Educ. secundaria completa	Años de educación (Poblac. 25 y más)	Ingreso familiar per cápita
Distrito	habitantes	IDH	años	%	Años	N.S. mes
Huaytará	23,361	0.3457	64.44	37.61	6.71	464.7
Córdova	2,558	0.4608	63.12	36.70	8.60	940.3

Fuente: INEI.

2.3 Marco teórico

2.3.1 Perforación y Voladura en Minería

La perforación y voladura son procesos esenciales en la minería, ya que permiten la fragmentación del material rocoso para su posterior extracción y procesamiento. La perforación consiste en la creación de barrenos en la roca mediante equipos especializados, mientras que la voladura implica la detonación controlada de explosivos dentro de estos barrenos para fragmentar el material de manera eficiente (Jiménez & López, 2020).

La efectividad de estos procesos depende de varios factores, como el diámetro y la profundidad de los taladros, la disposición de la malla de perforación, el tipo y cantidad de explosivos utilizados, y la secuencia de disparo. Un diseño inadecuado puede generar una fragmentación deficiente, impactando negativamente en las operaciones de carga, acarreo y procesamiento del material.

Proceso de Perforación y Voladura

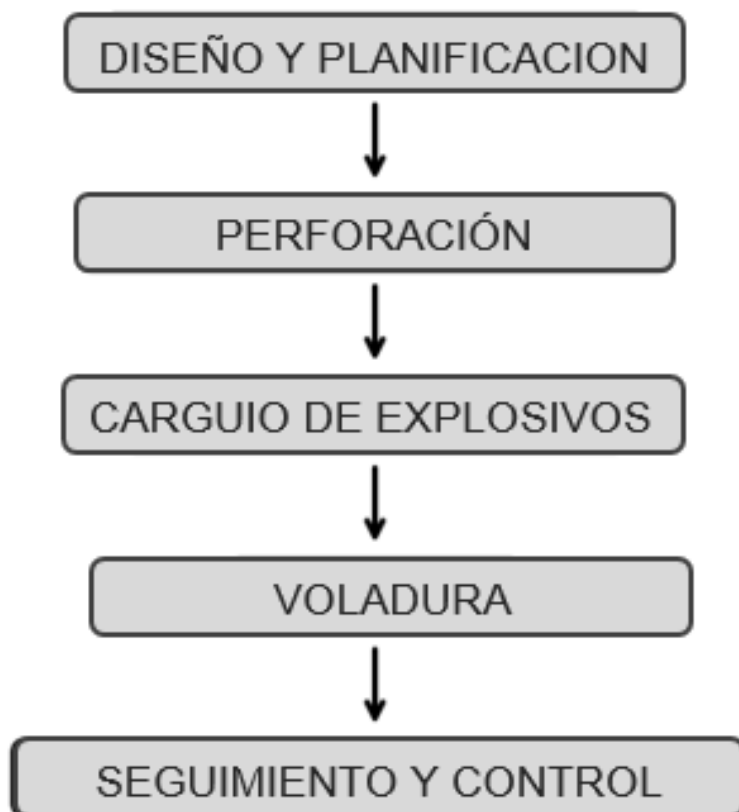


Figura 3 — Esquema del proceso de perforación y voladura

Fuente: Jiménez, R., & López, M. (2020). Optimización de la perforación y voladura en minería: Estrategias y mejores prácticas. Editorial Minera.

2.3.2 Fragmentación del Material y su Impacto en la Operación

La fragmentación del material es el resultado directo de la voladura y determina la eficiencia de los procesos mineros posteriores. Una fragmentación adecuada permite un

manejo eficiente del material, reduciendo los costos en transporte y procesamiento. Por otro lado, una fragmentación inadecuada genera bloques de gran tamaño que requieren voladuras secundarias, aumentando el consumo de explosivos y los costos operativos (González et al., 2019).

Los principales factores que influyen en la fragmentación incluyen la energía liberada por los explosivos, la geología del macizo rocoso, el espaciamiento de los barrenos y la secuencia de detonación. La optimización de estos factores contribuye a un mejor desempeño operacional y económico.

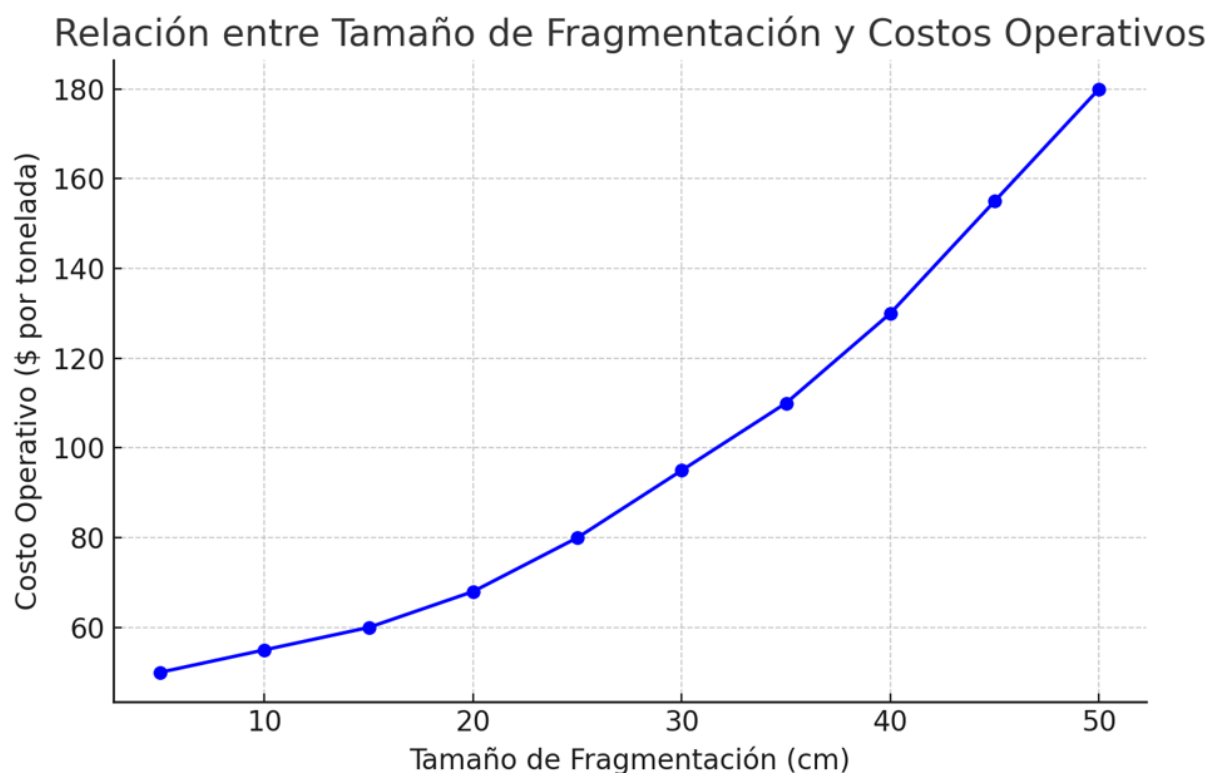


Figura 4 — Relación entre tamaño de fragmentación y costos operativos

Fuente: González, P., Ramírez, A., & Torres, L. (2019). Fragmentación y costos en operaciones mineras: Evaluación y optimización. *Revista de Minería y Geotecnia*, 27(3), 45-60.

2.3.3 Optimización de Parámetros de Perforación y Voladura

La optimización de la perforación y voladura busca mejorar la fragmentación del material mientras se minimizan los costos y riesgos operacionales. Los parámetros que afectan la eficiencia del proceso incluyen:

Diámetro de los barrenos: Afecta el tamaño de fragmentación y la cantidad de explosivos necesarios.

Malla de perforación: Define la distancia entre barrenos y su disposición en el macizo rocoso.

Tipo y cantidad de explosivos: Influye en la energía liberada y en la calidad de la fragmentación.

Secuencia de disparo: Determina el control de vibraciones y la dirección de fragmentación.

Un diseño optimizado garantiza una fragmentación homogénea y reduce la necesidad de voladuras secundarias, optimizando la eficiencia del ciclo minero (Martínez & Rojas, 2021).

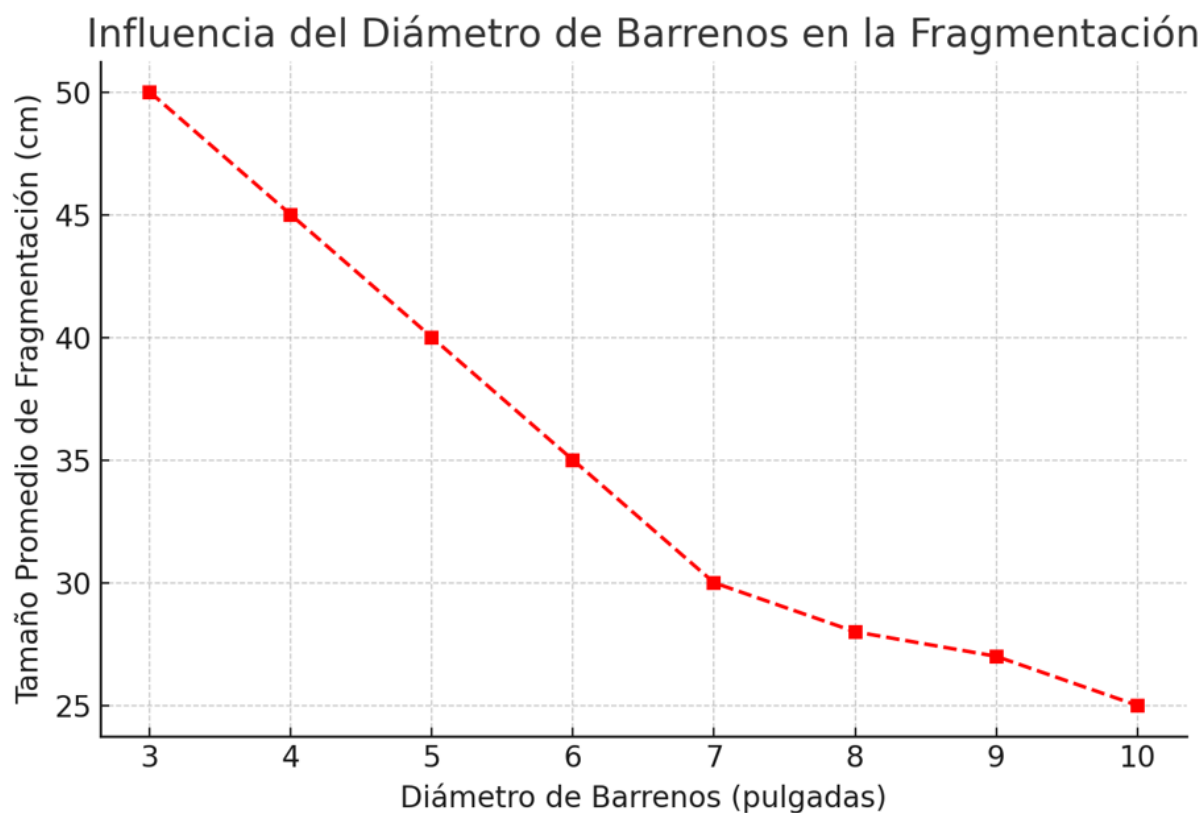


Figura 5 — Influencia del diámetro de barrenos en la fragmentación

Referencia: Martínez, H., & Rojas, S. (2021). Parámetros de perforación y su impacto en la eficiencia minera. Instituto de Ingeniería de Minas.

2.3.4 Costos Operativos Asociados a la Fragmentación y Voladuras

Secundarias

La fragmentación inadecuada puede generar costos significativos en las operaciones mineras. Entre los costos más relevantes se encuentran:

Aumento en el consumo de explosivos: Una mala fragmentación requiere voladuras secundarias, elevando el gasto en insumos.

Desgaste prematuro de equipos: Grandes bloques de material impactan negativamente en la maquinaria de carga y acarreo.

Incremento en los tiempos de ciclo: Una fragmentación deficiente prolonga los tiempos de operación, reduciendo la productividad.

Optimizar los parámetros de perforación y voladura permite reducir estos costos, incrementando la rentabilidad y sostenibilidad de la operación (Fernández & Castillo, 2018).

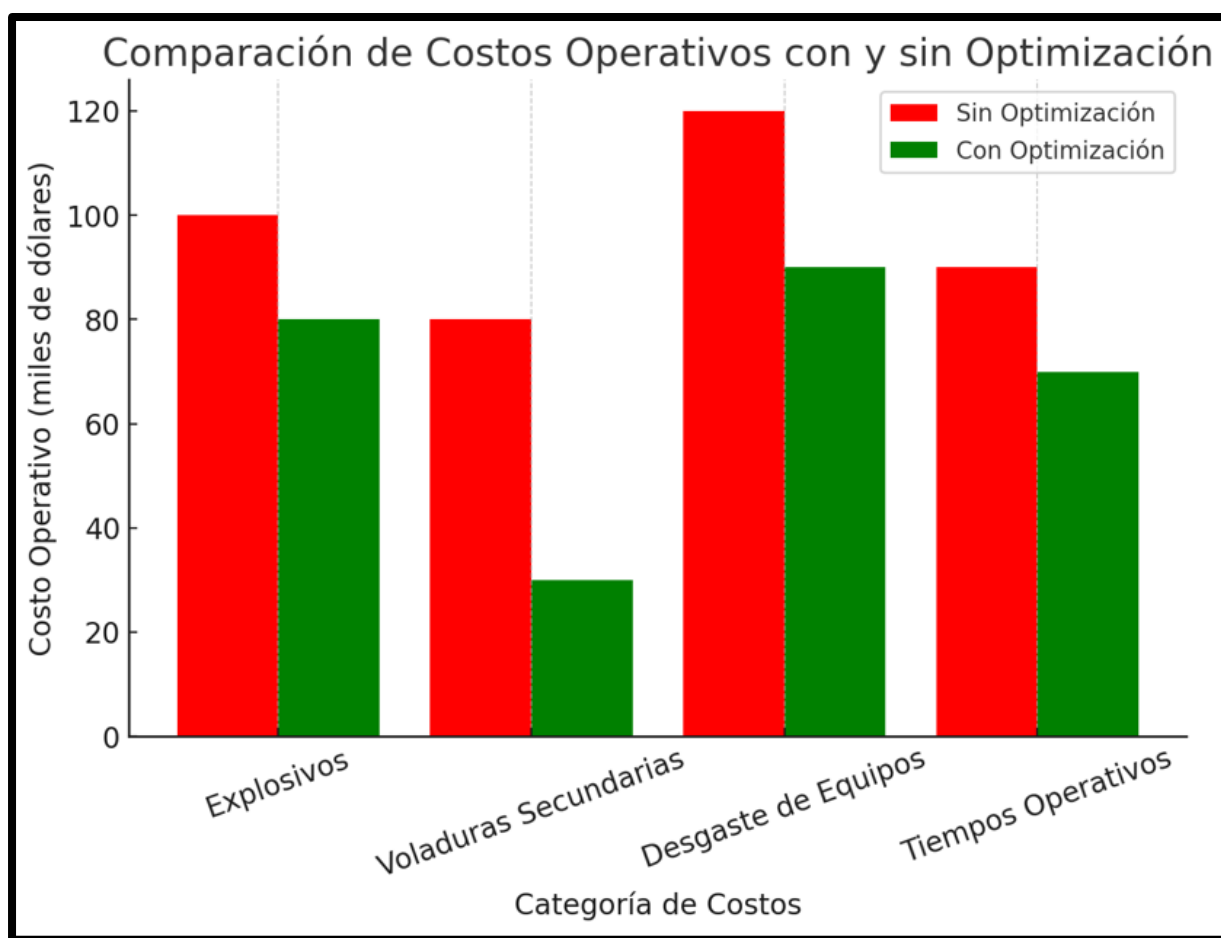


Figura 6 — Comparación de costos operativos con y sin optimización de fragmentación

Nota: Fernández, C., & Castillo, J. (2018). Análisis de costos en perforación y voladura: Impacto de la fragmentación en minería. Universidad Nacional de Ingeniería.

2.3.5 Seguridad en las Operaciones de Voladura

Las operaciones de voladura presentan riesgos que deben ser controlados mediante protocolos de seguridad y buenas prácticas. Los principales riesgos incluyen:

Proyección de fragmentos: Puede causar accidentes si no se respetan las distancias de seguridad.

Vibraciones y ondas de choque: Pueden afectar la estabilidad de estructuras cercanas.

Generación de gases tóxicos: Impacta la salud del personal y el ambiente.

Manipulación de explosivos: El manejo inadecuado puede generar explosiones no controladas.

Implementar medidas de control, como el diseño adecuado de la voladura y el monitoreo de vibraciones, contribuye a la seguridad del personal y la operación minera en general (Rodríguez & Vega, 2022).

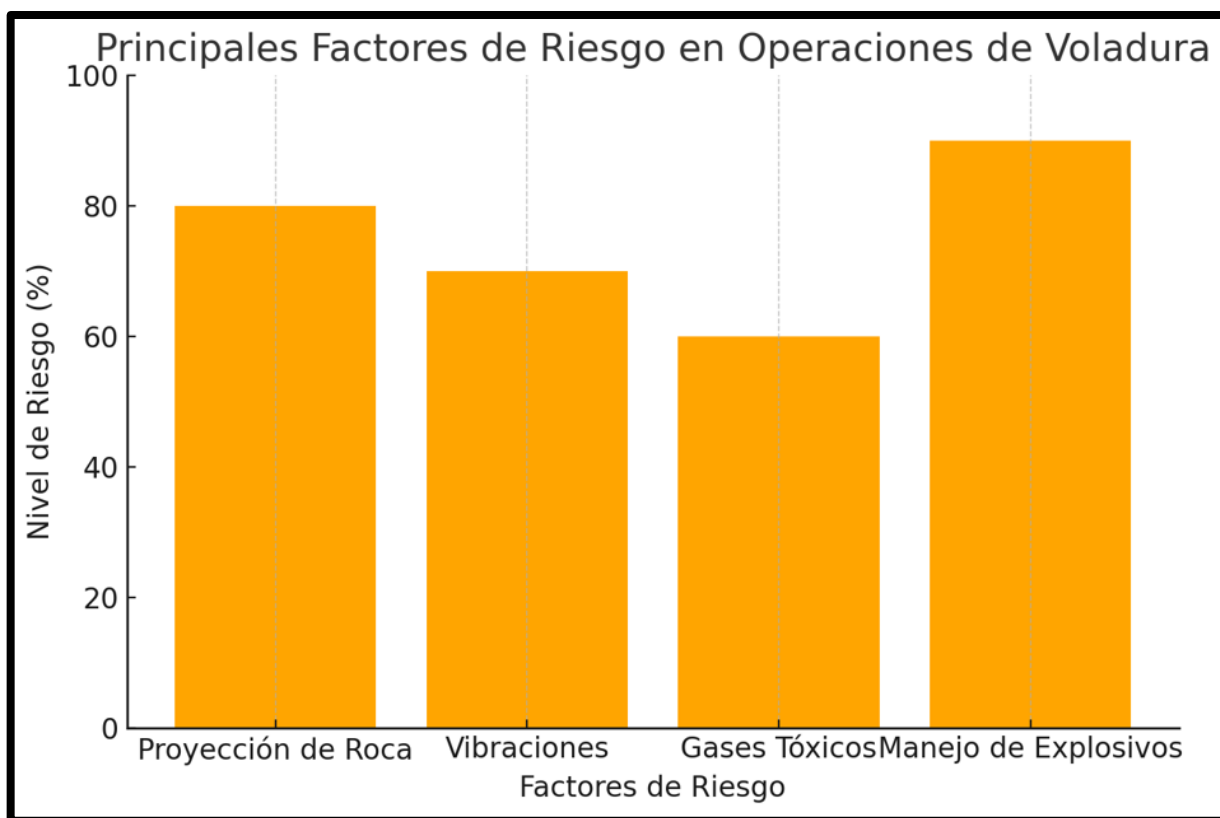


Figura 7 — Factores de riesgo en operaciones de voladura

Nota: Referencia: Rodríguez, P., & Vega, L. (2022). Seguridad en operaciones de voladura: Evaluación de riesgos y medidas de control. Sociedad Internacional de Minería Segura.

2.4 Definiciones conceptuales

2.4.1 Parada por niveles

Se trata de un método de explotación subterránea que se basa en desarrollar los niveles de explotación (subniveles) de forma horizontal para posteriormente obtener el mineral de la zona mediante explosivos, dejando cámaras o huecos vacíos sostenidos por pilares o rellenos. Este método es óptimo para el caso de cuerpos minerales con forma regular y buena competencia del macizo rocoso (Hustrulid & Bullock, 2001).

2.4.2 Recuperación del relleno

Es el proceso mediante el cual se extrae el relleno que se ha colocado en las cámaras de explotación cuando este ha cumplido su función de sostenimiento provisional. De la recuperación de este desprendimiento se obtiene el mineral remanente o se aporta estabilidad al macizo durante las nuevas etapas de explotación (De Souza et al., 2017).

2.4.3 Relleno cementado

Es la mezcla de relaves, agua y cemento que se introduce en las cámaras explotadas para proporcionar estabilidad estructural. La resistencia de este material puede ser alterada en función de los requerimientos del diseño geomecánico (Emad & Yves, 2018).

2.4.4 Estructura geológica

Estructura que está compuesta por planos, fracturas, fallas, vetas, que definen el comportamiento geomecánico de la masa rocosa. La dirección de estas formulaciones resulta ser un factor importante en los diseños de los métodos de explotación de las canteras, en especial cuando las operaciones se desarrollan en dicha dirección (Jumikis, 1983).

2.4.5 Dilución minera

Concepto que se refiere al ingreso de material estéril en el proceso de explotación y que provoca una disminución de la ley promedio del mineral extraído. La forma de controlar este fenómeno quedará ajustada con la adecuada recuperación desde el relleno (Pérez & Loyola, 2019).

2.4.6 Estabilidad del macizo rocoso

Capacidad del macizo rocoso para permanecer sin colapsar en condiciones óptimas en su inmediata proximidad a excavaciones subterráneas. Está determinada por la calidad geomecánica de dicha masa y por los esfuerzos inducidos, y por el tipo de sostenimiento aplicado a las excavaciones (Hoek & Brown, 1997).

2.4.7 Secuencia de minado

Secuencia invariante y estable de explotación de bloques de mineral diseñadas para optimizar la recuperación y para reducir riesgos de colapso en un determinado sistema, garantizando estabilidad de forma global. En Sublevel Stoping, la secuencia paralela a la estructura reduce interferencias (Laubscher, 2000).

2.4.8 Recuperación de mineral

Se entiende como el porcentaje de mineral que se puede recuperar económicamente en comparación con el total que hay en el yacimiento. Determinar el porcentaje de recuperación es una de las herramientas más destacadas para mejorar el beneficio de un proyecto minero (Chacón et al., 2021).

2.4.9 Diseño de cámaras y pilares

Definir las dimensiones y espaciamiento de las cámaras y pilares en función del macizo rocoso, tonelaje objetivo y seguridad. Un mal diseño puede dar lugar a colapsos o pérdidas de mineral (Hustrulid, 1999).

2.4.10 Fragmentación del macizo

El grado de ruptura del material tras una voladura. Una buena fragmentación facilita el proceso de cargar, transportar el mineral y el relleno (Jimeno et al, 1995).

2.4.11 Desarrollo horizontal

Son las galerías o rampas de acceso y ventilación en niveles alcanzados. La correcta planificación es clave para conectar zonas de explotación y evitar interferencias con equipos (González & Flores, 2020).

2.4.12 Malla de perforación

Distribución o ubicación de los taladros en el frente de explotación, en función del uso de explosivos, colección de fragmentos y sobre excavación, por lo que su precisión condiciona la recuperación del relleno tras la voladura (Cunningham, 2005).

2.4.13 Sostenimiento temporal y permanente

Conjunto de elementos estructurales, tales como pernos, mallas o rellenos, empleados para asegurar la estabilidad de las excavaciones. El relleno cementado puede cumplir también funciones tanto temporales como permanentes (Villa & Ruiz, 2016).

2.4.14 Ciclo de minado

Conjunto de actividades necesarias para completar un ciclo de explotación, desde la perforación, voladura, recuperación de mineral o relleno. La mejora del ciclo -lo que implica aumentarla productividad (Torres & Vélchez, 2022).

2.4.15 Voladura controlada

Es una voladura determinada en la fragmentación del macizo rocoso mediante explosivos, planificado con el fin de minimizar el daño colateral, maximizar la recuperación y asegurar de este modo la estabilidad. Fundamental para un sublevel stoping (Persson et al., 1994).

2.4.16 Macizo rocoso competente

Se refiere a aquel macizo que posee buena cohesión y resistencia, además de ser capaz de soportar la excavación sin requerir para tal la prestación de sostenimientos intensivos, que es deseable en métodos como lo es el Sublevel Stopping (Hoek, 2007).

2.4.17 Ley de mineral

La concentración de metal valioso en el material extraído. Recuperar eficientemente el relleno y el mineral permite reducir la pérdida de zonas de alta ley (Martínez & Del Valle, 2018).

2.4.18 Método paralelo a la estructura

Modalidad de explotación que va de la mano del rumbo de las vetas o cuerpos mineralizados, que permite una mayor adaptación del método al modelo geológico, y que permite un mejor control de estabilidad (Ramírez, 2020).

2.4.19 Eficiencia operativa

La relación entre los recursos utilizados y los resultados obtenidos. Aumentando la recuperación del relleno, se incrementa la eficiencia, ya que se disminuyen retrabajos y pérdidas (Chacón et al., 2021).

2.4.20 Gestión minera sostenible

La práctica de los principios de la minería sostenible que debe procurar maximizar el uso de los recursos minerales, alcanzar condiciones de seguridad, rentabilidad y cuidado al medio ambiente. Se afirma que recuperar el relleno de manera eficiente es una práctica alineada con la gestión minera sostenible (Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2021).

CAPITULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Marco Metodológico

3.1.1 Tipo de investigación

El tipo de investigación es aplicada. Es aplicada porque busca resolver un problema práctico en la industria minera mediante la optimización de la voladura en una mina subterránea (Hernández Sampieri et al., 2014).

3.1.2 Nivel de investigación

El nivel de investigación es explicativo. Este nivel de investigación no solo describe el fenómeno, sino que también pretende comprender las razones detrás de su comportamiento y los efectos de su implementación en distintos escenarios mineros (Hernández Sampieri et al., 2014).

Además, al analizar las condiciones con la investigación permite generar modelos predictivos y recomendaciones para su optimización. De esta manera, se sustenta en el análisis de datos empíricos, pruebas experimentales y simulaciones para explicar cómo la modificación en los procesos de voladura en minería subterránea (Kerlinger & Lee, 2002).

3.1.3 Diseño de investigación.

El diseño de la investigación es cuasi-experimental, ya que implica la manipulación de variables en un entorno real sin un control total sobre todas las condiciones externas. A través

del uso de modelado numérico, simulaciones computacionales y pruebas en campo, se evaluará la eficiencia del nuevo diseño de voladura en términos de productividad, sobreexcavación, dilución y costos operacionales (Campbell & Stanley, 1966).

La investigación sigue un diseño longitudinal, ya que analizará los cambios en las condiciones operativas de la mina a lo largo del tiempo para determinar la optimización de la recuperación y su impacto a largo plazo. Este enfoque permite obtener conclusiones más precisas sobre la viabilidad técnica y económica de la metodología propuesta en el contexto minero (Hernández Sampieri et al., 2014).

3.2 Hipótesis

3.2.1 Hipótesis general

- La mejora en el proceso de recuperación del relleno, aplicado al método de Sublevel Stopping paralelo a la estructura, optimiza significativamente la recuperación de mineral en el Tajo 244 de la Mina Antapite.

3.2.2 Formulación de hipótesis específicas

- El bajo nivel de recuperación de mineral en el Tajo 244 se debe a deficiencias en el diseño y control del relleno utilizado en el método de Sublevel Stopping.
- La identificación y corrección de factores geomecánicos y operativos permite mejorar la eficiencia en la recuperación del relleno y disminuir la dilución del mineral.

- La implementación de mejoras técnicas en la planificación y ejecución del ciclo de minado y relleno incrementa la recuperación efectiva del mineral en zonas paralelas a la estructura.

3.3 Variables e indicadores

3.3.1 Operacionalización de variables

Tabla 3. Operacionalización de variables

Variable	Definición Conceptual	Dimensiones	Indicadores	Herramientas
VI: Mejora en el proceso de recuperación del relleno	Conjunto de acciones técnicas y operativas aplicadas para optimizar la recuperación del material de relleno en el método de Sublevel Stoping.	Diseño del relleno	Tipo de relleno utilizado	Fichas técnicas
		Secuencia de minado	Secuencia de perforación y voladura	Observación directa
		Control operativo	Parámetros de control del relleno	Entrevistas técnicas
VD: Optimización de la recuperación de mineral	Aumento en la eficiencia del proceso de extracción del mineral, reduciendo pérdidas y dilución, y maximizando el tonelaje recuperado.	Recuperación del mineral	% de recuperación	Reportes de producción
		Dilución	% de dilución	Software de modelamiento
		Rendimiento operativo	Tons/día recuperadas	Datos históricos

Nota: Elaboración propia

3.3.2 Variable independiente

- Mejora en el proceso de recuperación del relleno.

3.3.3 Variable dependiente

- Optimización de la recuperación de mineral

3.3.4 Instrumentos

Los instrumentos que se usarán para la recolección de datos serán seleccionados de manera que nos permitirán realizar el trabajo en forma ordenada y metódica, Consideramos los siguientes:

- a. Ficha de Registro de Datos de Campo (Observación), llamado también ficha de observación como los reportes e informes generados por el área de mina (Ficha de observación).
- b. Programa del Split Desktop: Permite calcular la fragmentación.

3.3.5 Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Desde un punto de vista el análisis consiste en desmenuzar la información recogida examinando cada una de sus partes lo cual permite la obtención de sus características más relevantes, en conclusión, el análisis es ordenar las relaciones y consecuencias que surjan de la información obtenida (Niño, 2011, pág. 104).

Para el procesamiento de datos y análisis, se recolectará toda la información necesaria mediante los instrumentos planteados, luego se procesarán y analizarán mediante el software Microsoft Excel. Una vez obtenidos los resultados del cálculo, se utilizará el software Split desktop para medir la fragmentación.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Resultados

El presente capítulo tiene como finalidad exponer y analizar los resultados obtenidos tras la implementación de la mejora en el proceso de recuperación de relleno mediante el bypass 244 SE paralelo a la estructura mineralizada, aplicado en la Unidad Minera Sierra Antapite. Esta mejora fue diseñada con el propósito de optimizar la continuidad operativa, reducir la dilución del mineral y aumentar la productividad del método de explotación Sublevel Stopping.

La evaluación de los resultados se realizó mediante un diseño de investigación cuasi-experimental de tipo longitudinal, comparando los indicadores técnicos y económicos antes y después de la aplicación de cuadros de madera hasta cruzar toda la estructura mineralizada en el bypass 244, correspondientes al segundo y tercer trimestre del año 2025. Los indicadores analizados fueron: toneladas por día (tpd) como medida de productividad, ley del mineral (g/t Au) como indicador de calidad del mineral extraído, dilución (%) como parámetro de selectividad del proceso, y costo unitario (USD/T) como variable económica representativa de la eficiencia operativa.

La recopilación de datos se realizó a partir de los reportes de producción, análisis metalúrgicos y registros operativos emitidos por el área de mina. Posteriormente, la información fue procesada y comparada para determinar las variaciones generadas por la implementación del bypass, identificando la magnitud de su impacto técnico y económico.

Los resultados que se presentan en este capítulo permiten validar las hipótesis planteadas y demostrar cómo la incorporación de cuadros de madera bajo la estructura mineralizada en las diferentes ventanas del bypass 244 SE contribuyó a una mejora significativa en la recuperación del mineral (+48.40 %), incremento de la ley (+28.99 %), reducción de la dilución (-37.08 %) y disminución de los costos operativos (-17.24 %). Asimismo, se discuten los efectos derivados de esta mejora en la estabilidad geomecánica y la continuidad del ciclo minero, consolidando un modelo operativo más eficiente, seguro y sostenible para futuras aplicaciones en otras zonas de la mina.

Tabla 4. *Parámetros del segundo trimestre*

Mes	tpd	Ley	Dilución	USD/T
Mes 1	518	3.03	19.59	136.80
Mes 2	518	3.02	19.49	136.10
Mes 3	517	3.04	19.45	136.89
Total	518	3.03	19.51	136.59

Nota. Parámetros de toneladas por día, Ley, dilución y costo de extracción de los meses de abril, mayo y junio del 2025.

En la Tabla 2 se presentan los resultados promedio de los principales indicadores operativos correspondientes al segundo trimestre del año 2025, periodo previo a la implementación del bypass 245 SE paralelo a la estructura mineralizada. Los datos reflejan el desempeño base del proceso de recuperación de relleno bajo las condiciones operativas originales del método Sublevel Stopping en la Unidad Minera Sierra Antapite.

Durante este trimestre, la producción promedio diaria alcanzó las 518 toneladas por día (tpd), evidenciando una baja continuidad operativa atribuida a la limitada conectividad entre cámaras y al difícil acceso al mineral remanente en los rellenos cementados. En cuanto a la ley

promedio del mineral, se obtuvo un valor de 3.03 g/t Au, lo que indica un aprovechamiento parcial de las zonas de alta ley, consecuencia directa de una recuperación con baja precisión y alta incorporación de material estéril.

El porcentaje de dilución promedio fue de 19.51 %, un valor elevado que refleja una ineficiencia en la selectividad del proceso de extracción, generando una mezcla considerable de material no mineralizado dentro del mineral recuperado. Este nivel de dilución repercute negativamente en la rentabilidad de la operación, ya que incrementa los costos de transporte y procesamiento. Finalmente, el costo unitario promedio se estimó en 136.59 USD/T, cifra que evidencia un rendimiento económico moderado debido a la baja recuperación efectiva del mineral y a la necesidad de retrabajos en la etapa de minado y relleno.

En conjunto, estos valores iniciales constituyen el punto de comparación base para evaluar el impacto de la mejora implementada en el tercer trimestre. Los resultados del segundo trimestre permiten identificar las principales deficiencias del sistema original, entre ellas: el bajo factor de recuperación, la alta dilución y la falta de optimización del ciclo de minado, aspectos que justificaron la aplicación del bypass como una estrategia técnica para mejorar la productividad, la selectividad y la eficiencia económica del proceso minero.

3.4 Procedimiento de la implementación de cuadros en ventanas para cruzar la estructura mineralizada en el bypass 244 SE

La implementación de cuadros en ventanas para cruzar la estructura mineralizada en el bypass 244 SE en la Unidad Minera Sierra Antapite se desarrolló siguiendo una secuencia técnica y operativa estructurada, orientada a optimizar la recuperación del relleno y del mineral remanente

bajo el método de explotación Sublevel Stopping. El procedimiento se ejecutó en fases planificadas que abarcaron desde la etapa de diagnóstico hasta la validación de resultados, asegurando el cumplimiento de criterios geomecánicos, de seguridad y de eficiencia operativa.

3.4.1 Diagnóstico técnico y geomecánico inicial

Se realizó una caracterización geomecánica del macizo rocoso de la zona Zorro Rojo, Bypass 244 SE mediante la recopilación de datos de campo (RQD, RMR y GSI), determinando un macizo de tipo III B, con competencia media y buena estabilidad para excavaciones paralelas.

Se evaluaron los parámetros estructurales de la veta mineralizada (rumbo, buzamiento y potencia) a fin de definir la orientación óptima del bypass en paralelo a la estructura principal.

Se analizaron los registros de producción y recuperación del periodo previo (segundo trimestre), identificando problemas de desconexión entre cámaras, altos niveles de dilución (19.5 %) y baja recuperación (518 tpd), lo que justificó la necesidad de la mejora.

3.4.2 Diseño técnico del bypass paralelo

Con base en los resultados del diagnóstico, se elaboró el diseño geométrico del bypass 244 SE, definiendo su trazado paralelo a la estructura mineralizada, con un ángulo de inclinación de 75° y una longitud aproximada de 160 m.

Se establecieron las secciones de desarrollo (2.7 m × 3.0m) y las conexiones a la estructura mediante ventanas con una sección típica de 2.4 x 2.4 con los subniveles existentes a través de galerías de enlace, garantizando la continuidad entre cámaras.

Se realizaron modelaciones 3D en software de planificación minera (AutoCAD y Deswik) para verificar la compatibilidad con el diseño actual de los tajos y evitar interferencias estructurales o zonas de esfuerzo concentrado.

Se validó el diseño mediante un análisis de estabilidad con criterios de seguridad geotécnica ($FS \geq 1.5$), asegurando la viabilidad de la excavación paralela al cuerpo mineralizado.

3.4.3 Ejecución del desarrollo del bypass

Se inició la perforación y voladura controlada del bypass siguiendo el rumbo de la estructura mineralizada, empleando taladros de 45 mm de diámetro, burden de 1.2 m y espaciamiento de 1.3 m, para garantizar una fragmentación homogénea.

Se utilizó explosivo tipo Emulnor 3000 con un factor de carga promedio de 1.05 kg/m³, optimizando la energía de voladura para evitar sobreexcavaciones y mantener la estabilidad del macizo.

El carguío del material se efectuó con scooptram de 2.2 yd³, priorizando la evacuación continua hacia el nivel de transporte.

Posteriormente, se realizaron labores de sostenimiento primario mediante pernos Split Set de 5 pies de longitud, malla electrosoldada con Split set de 7 pies en zonas críticas.

En paralelo, se implementó un sistema de drenaje y ventilación auxiliar, conectado a las galerías superiores, para mantener condiciones seguras durante la excavación.

3.4.4 Conexión operativa con cámaras y rellenos existentes

Se habilitaron interconexiones laterales (ventanas) entre el bypass y las cámaras contiguas del subnivel 244 SE, permitiendo el acceso directo al mineral remanente.

Se rediseñó la secuencia de recuperación considerando la extracción de mineral desde el punto más lejano hacia la conexión principal, reduciendo el riesgo de colapso y mejorando la estabilidad general.

Se controló la recuperación del relleno mediante sondeos de verificación y muestreo continuo para evitar la sobreextracción y minimizar la dilución.

La información obtenida de cada avance fue monitoreada con instrumentos de control geotécnico (extensómetros y piezómetros) para evaluar deformaciones y presiones internas en el macizo.

3.4.5 Monitoreo, evaluación y validación de resultados

Una vez concluida la implementación del bypass, se realizó un seguimiento diario de los indicadores operativos: toneladas por día (tpd), ley del mineral (g/t Au), dilución (%) y costo unitario (USD/T).

Los datos fueron comparados con los registros del segundo trimestre, verificándose una mejora del 48.40 % en la productividad, reducción de la dilución en 37.08 %, y una disminución del costo unitario en 17.24 %.

Se validó la efectividad técnica y económica del bypass como una alternativa sostenible y replicable, reforzando la planificación minera para futuros sectores con características geológicas semejantes.

3.4.6 Conclusión del procedimiento

La implementación de cuadros en las ventanas en toda la longitud del bypass 244 SE paralelo a la estructura mineralizada permitió mejorar significativamente la conectividad entre cámaras, facilitar el acceso al relleno y optimizar el flujo de mineral, logrando una extracción más continua, segura y rentable. Este procedimiento representa un modelo de mejora operativa integral, donde la coordinación entre el diseño geomecánico, la planificación del ciclo minero y el control de la recuperación del relleno se consolidan como pilares fundamentales para elevar la eficiencia global del método Sublevel Stopping.

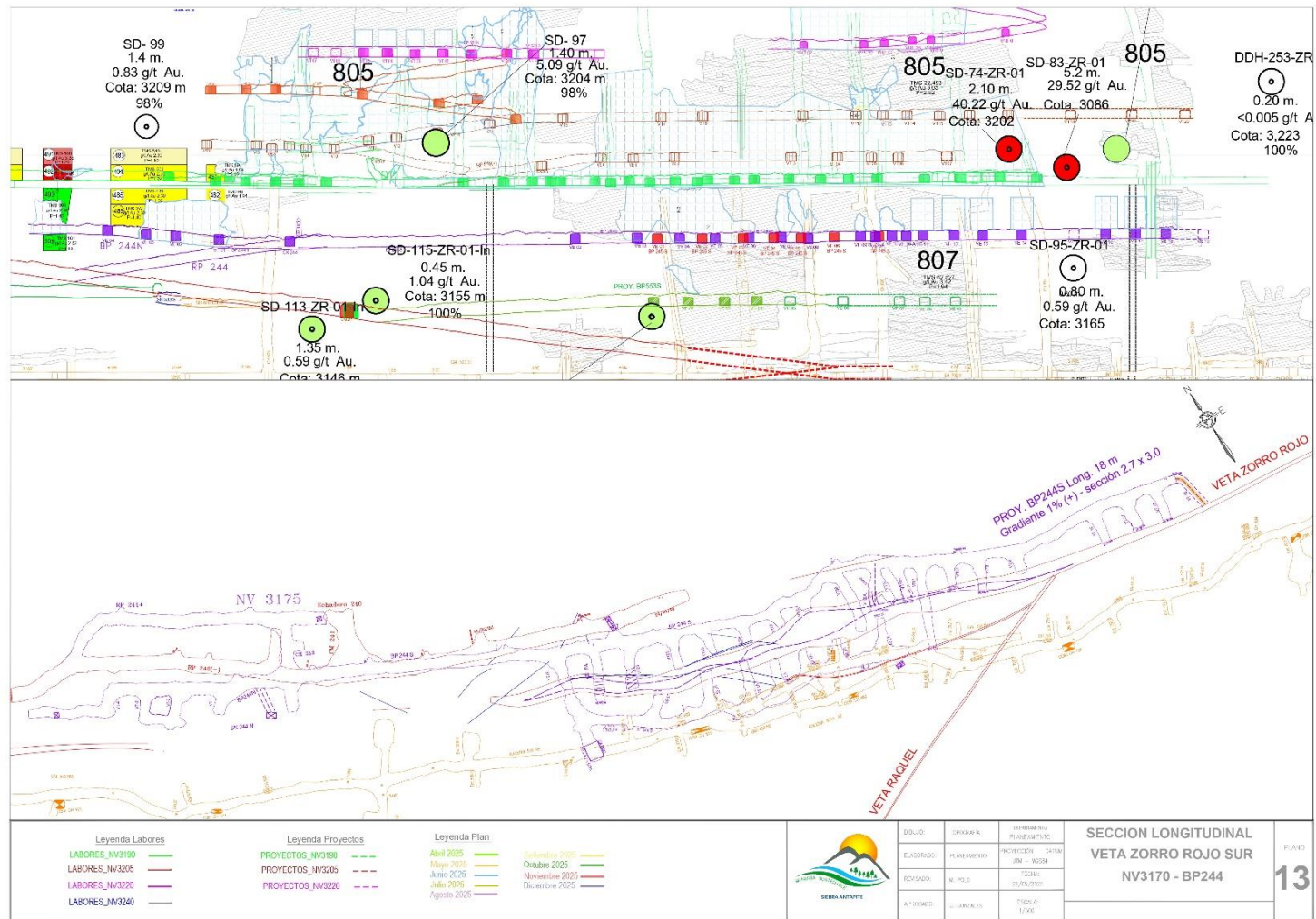


Figura 8 — Plano del Bypass 244 SE

Fuente: Área de Planeamiento

3.5 Resultados de la Implementación de cuadros en ventanas para cruzar la estructura mineralizada en el Bypass 244 SE

La implementación de cuadros en ventanas para cruzar la estructura mineralizada en el bypass 244 SE en la Unidad Minera Sierra Antapite generó mejoras sustanciales en los indicadores técnicos, operativos y económicos del proceso de recuperación de relleno bajo el método Sublevel Stopping. Los resultados obtenidos permiten evidenciar la efectividad de esta mejora estructural en la optimización de la recuperación de mineral y la reducción de los costos de operación.

3.5.1 Incremento de la productividad (Toneladas por día – TPD)

Antes de la mejora (segundo trimestre de 2025), la producción promedio diaria alcanzaba 518 TPD, mientras que tras la implementación del bypass, en el tercer trimestre, la producción aumentó a 768 TPD, representando un incremento del 48.40 %. Este resultado se atribuye a la mayor continuidad operativa y a la reducción de tiempos improductivos gracias a la conectividad directa entre cámaras y subniveles, permitiendo una extracción continua del mineral y del relleno cementado.

3.5.2 Mejora en la ley del mineral (g/t Au)

La ley promedio del mineral se incrementó de 3.03 g/t Au a 3.91 g/t Au, evidenciando una mejora del 28.99 %. El incremento en la ley se explica por una mayor selectividad en la extracción y una disminución de la mezcla con material estéril, lograda mediante el control del relleno y la orientación del minado paralelo a la estructura mineralizada, que permitió acceder a zonas de mayor concentración de oro con menor dilución.

3.5.3 Reducción significativa de la dilución (%)

El porcentaje de dilución se redujo de 19.51 % en el segundo trimestre a 12.27 % en el tercero, lo que representa una disminución del 37.08 %. Este resultado confirma que la mejora en el proceso de recuperación del relleno mediante el bypass favoreció la precisión en la extracción y la estabilidad geomecánica, evitando el colapso o la mezcla de materiales no mineralizados. La reducción de la dilución también mejoró la eficiencia metalúrgica en planta y la calidad del mineral enviado al procesamiento.

3.5.4 Disminución del costo unitario (USD/T)

El costo unitario por tonelada se redujo de 136.59 USD/T a 113.04 USD/T, generando un ahorro del 17.24 %. Esta disminución se debe al aumento de la productividad, a la reducción de retrabajos por colapsos de relleno, y a la mejor gestión de los recursos operativos y logísticos. El bypass permitió un flujo de extracción más estable, reduciendo los tiempos muertos y los costos de mantenimiento asociados a la ineficiencia del sistema anterior.

3.5.5 Impacto técnico y geomecánico

La implementación del bypass permitió un mejor control estructural del macizo rocoso, manteniendo la estabilidad durante la recuperación del relleno y evitando desplazamientos o deformaciones críticas. Los resultados de los monitoreos geotécnicos (extensómetros y control visual) confirmaron que el factor de seguridad promedio se mantuvo superior a 1.5, lo que garantizó operaciones seguras y sostenibles.

3.5.6 Conclusión de los resultados

Los resultados de la implementación del bypass 244 SE paralelo a la estructura mineralizada demuestran una mejora integral del sistema de recuperación de relleno, consolidando una operación más eficiente, segura y rentable. El rediseño permitió incrementar la recuperación de mineral, reducir las pérdidas metálicas y mejorar la estabilidad de las cámaras, validando la viabilidad técnica y económica de replicar este modelo en otros sectores con condiciones geológicas similares dentro de la Unidad Minera Sierra Antapite.

Tabla 5. *Parámetros del tercer trimestre*

Mes	tpd	Ley	Dilución	USD/T
Mes 1	765	3.91	12.28	113.15
Mes 2	769	3.91	12.28	112.78
Mes 3	771	3.90	12.26	113.20
Total	768	3.91	12.27	113.04

Nota. Parámetros de toneladas por día, ley, dilución y costo de trituración de los meses de julio, agosto y septiembre del 2025.

La Tabla 5 muestra los resultados promedio de los indicadores operativos correspondientes al tercer trimestre del año 2025, posterior a la implementación del bypass 244 SE paralelo a la estructura mineralizada en la Unidad Minera Sierra Antapite. Este periodo refleja el desempeño del proceso de recuperación de relleno bajo el nuevo esquema de conexión y secuencia de minado optimizado.

Durante este trimestre, la producción promedio diaria se elevó a 768 toneladas por día (tpd), representando un incremento del 48.40 % respecto al trimestre anterior. Este aumento evidencia

una mayor continuidad operativa y eficiencia del sistema de recuperación, gracias a la conectividad proporcionada por el bypass, que permitió acceder a zonas previamente limitadas y mejorar el flujo de mineral.

En cuanto a la ley promedio del mineral, se alcanzó un valor de 3.91 g/t Au, lo que representa una mejora del 28.99 % frente al segundo trimestre. Este incremento se asocia a una recuperación más selectiva de las zonas de alta ley, derivada del control estructural del relleno y de la reducción en la mezcla con material estéril.

El porcentaje de dilución descendió significativamente hasta 12.27 %, mostrando una disminución del 37.08 % con relación al periodo previo. Esta reducción confirma que la mejora implementada favoreció la precisión en la extracción del mineral útil y minimizó la incorporación de material estéril, lo cual repercute positivamente en la calidad del mineral enviado a planta.

Finalmente, el costo unitario promedio se redujo a 113.04 USD/T, lo que representa una disminución del 17.24 % respecto al segundo trimestre. Esta mejora económica se explica por el aumento en la productividad, la reducción de retrabajos y el aprovechamiento más eficiente del mineral disponible, reflejando un proceso más rentable y sostenible.

En síntesis, los resultados del tercer trimestre demuestran que la implementación del bypass 244 SE paralelo a la estructura mineralizada generó mejoras sustanciales tanto en los aspectos técnicos como económicos, consolidando un modelo de recuperación del relleno más controlado, seguro y altamente eficiente dentro del método Sublevel Stoping.

Tabla 6. *Descripción de indicadores*

Indicador	Descripción
-----------	-------------

tpd	Toneladas por día recuperación de mineral
Ley	Gramos por tonelada de Au
Dilución	Dilución
USD/T	Costo por tonelada de extracción

Nota. Descripción de los parámetros utilizados

Tabla 7. *Parámetros abril 2025*

Mes	Fecha	tpd	Ley	Dilución	USD/T
Abril	1/04/2025	528	2.97	19.44	138.64
Abril	2/04/2025	509	3.00	19.14	138.81
Abril	3/04/2025	529	3.04	19.45	137.65
Abril	4/04/2025	518	3.05	19.59	133.12
Abril	5/04/2025	507	2.96	19.75	133.47
Abril	6/04/2025	505	3.04	19.57	135.95
Abril	7/04/2025	515	3.01	19.60	138.37
Abril	8/04/2025	527	2.97	19.80	137.01
Abril	9/04/2025	526	3.03	19.33	133.78
Abril	10/04/2025	507	3.08	19.93	138.96
Abril	11/04/2025	519	3.01	19.84	137.65
Abril	12/04/2025	529	3.07	19.29	137.27
Abril	13/04/2025	524	3.03	19.87	137.16
Abril	14/04/2025	518	3.01	19.95	137.60
Abril	15/04/2025	524	3.10	19.88	135.39
Abril	16/04/2025	505	3.07	19.34	134.69
Abril	17/04/2025	516	3.03	19.69	138.60
Abril	18/04/2025	529	3.07	19.40	134.61
Abril	19/04/2025	506	3.05	19.06	135.17
Abril	20/04/2025	511	3.08	19.50	138.33
Abril	21/04/2025	522	3.05	19.93	134.62
Abril	22/04/2025	516	2.99	19.90	137.56
Abril	23/04/2025	527	3.02	19.79	138.98
Abril	24/04/2025	525	3.10	19.30	138.93
Abril	25/04/2025	526	2.99	19.81	135.08
Abril	26/04/2025	522	3.01	19.35	138.76
Abril	27/04/2025	513	2.98	19.19	139.44
Abril	28/04/2025	513	3.01	19.79	133.53
Abril	29/04/2025	524	2.99	19.28	136.33
Abril	30/04/2025	506	3.01	19.97	138.70
Promedio		518	3.0	19.6	136.80

Nota. Parámetros de toneladas por día, ley, dilución y costo de trituración de abril del 2025.

Tabla 8. *Parámetros mayo 2025*

Mes	Fecha	tpd	Ley	Dilución	USD/T
Mayo	1/05/2025	522	3.07	19.52	139.63
Mayo	2/05/2025	516	3.01	19.39	133.58
Mayo	3/05/2025	525	3.05	19.59	133.44
Mayo	4/05/2025	516	3.00	19.11	133.53
Mayo	5/05/2025	520	2.96	19.11	136.01
Mayo	6/05/2025	530	2.96	19.42	139.10
Mayo	7/05/2025	517	2.97	19.10	133.82
Mayo	8/05/2025	515	3.08	19.57	136.91
Mayo	9/05/2025	527	2.96	19.66	134.36
Mayo	10/05/2025	525	2.99	19.74	136.96
Mayo	11/05/2025	523	3.07	19.26	135.93
Mayo	12/05/2025	530	3.08	19.63	138.36
Mayo	13/05/2025	506	2.97	19.57	134.95
Mayo	14/05/2025	509	2.97	19.01	134.89
Mayo	15/05/2025	517	3.04	20.00	137.22
Mayo	16/05/2025	511	3.08	19.96	133.30
Mayo	17/05/2025	527	3.06	19.96	136.50
Mayo	18/05/2025	528	3.09	19.11	139.80
Mayo	19/05/2025	514	2.99	19.01	138.07
Mayo	20/05/2025	510	2.97	19.72	134.56
Mayo	21/05/2025	506	2.96	19.96	137.14
Mayo	22/05/2025	517	3.09	19.22	133.24
Mayo	23/05/2025	520	3.07	19.85	136.68
Mayo	24/05/2025	508	3.00	19.07	138.94
Mayo	25/05/2025	519	3.01	19.39	133.13
Mayo	26/05/2025	513	3.00	19.37	138.94
Mayo	27/05/2025	521	2.97	19.65	138.45
Mayo	28/05/2025	511	3.07	19.03	134.23
Mayo	29/05/2025	516	3.09	19.97	136.02
Mayo	30/05/2025	511	3.01	19.71	133.17
Mayo	31/05/2025	524	3.00	19.40	138.19
Promedio		518	3.0	19.5	136.10

Nota. Parámetros de toneladas por día, ley, dilución y costo de trituración de mayo del 2025.

Tabla 9. *Parámetros junio 2025*

Mes	Fecha	tpd	Ley	Dilución	USD/T
Junio	1/06/2025	507	3.08	19.95	133.66
Junio	2/06/2025	523	2.97	19.16	135.46
Junio	3/06/2025	526	3.10	19.42	137.69
Junio	4/06/2025	528	3.07	19.69	138.92
Junio	5/06/2025	511	3.01	19.03	139.94
Junio	6/06/2025	529	3.00	19.59	137.07
Junio	7/06/2025	529	3.07	19.42	137.50
Junio	8/06/2025	529	2.99	19.40	135.90
Junio	9/06/2025	513	3.07	19.42	137.60
Junio	10/06/2025	525	2.98	19.73	136.54
Junio	11/06/2025	525	3.10	19.28	137.62
Junio	12/06/2025	510	3.04	19.24	137.41
Junio	13/06/2025	511	3.07	19.27	139.50
Junio	14/06/2025	527	3.10	19.33	135.95
Junio	15/06/2025	522	3.07	19.79	136.65
Junio	16/06/2025	513	3.09	19.91	139.62
Junio	17/06/2025	508	2.95	19.33	133.51
Junio	18/06/2025	519	2.97	19.83	137.39
Junio	19/06/2025	506	3.10	19.17	135.14
Junio	20/06/2025	511	2.96	19.08	135.10
Junio	21/06/2025	526	3.01	19.93	138.66
Junio	22/06/2025	518	3.04	19.29	133.81
Junio	23/06/2025	504	3.06	19.58	139.74
Junio	24/06/2025	505	3.00	19.18	137.18
Junio	25/06/2025	515	2.96	19.66	136.03
Junio	26/06/2025	504	3.05	19.09	133.21
Junio	27/06/2025	505	3.07	19.48	137.12
Junio	28/06/2025	516	3.10	19.39	138.97
Junio	29/06/2025	524	3.09	19.88	134.09
Junio	30/06/2025	521	2.95	19.03	139.64
Promedio		517	3.0	19.5	136.89

Nota. Parámetros de toneladas por día, ley, dilución y costo de trituración de junio del 2025.

Tabla 10. *Parámetros julio 2025*

Mes	Fecha	tpd	Ley	Dilución	USD/T
Julio	1/07/2025	778	3.93	12.23	112.02
Julio	2/07/2025	777	3.86	12.30	112.62
Julio	3/07/2025	779	3.98	12.55	110.37
Julio	4/07/2025	767	3.85	12.41	114.79
Julio	5/07/2025	763	3.87	12.15	114.95
Julio	6/07/2025	756	3.89	12.48	114.26
Julio	7/07/2025	755	3.89	12.21	111.42
Julio	8/07/2025	752	3.91	12.01	110.95
Julio	9/07/2025	750	3.86	12.04	113.86
Julio	10/07/2025	780	3.85	12.41	113.91
Julio	11/07/2025	785	3.85	12.14	113.90
Julio	12/07/2025	758	3.94	12.42	113.47
Julio	13/07/2025	755	3.90	12.36	112.20
Julio	14/07/2025	763	3.97	12.50	115.44
Julio	15/07/2025	752	3.82	12.11	111.82
Julio	16/07/2025	758	3.97	12.02	115.45
Julio	17/07/2025	777	3.96	12.10	114.46
Julio	18/07/2025	754	3.98	12.23	114.11
Julio	19/07/2025	774	3.91	12.44	115.20
Julio	20/07/2025	763	3.99	12.48	113.01
Julio	21/07/2025	774	3.87	12.48	112.40
Julio	22/07/2025	760	3.87	12.14	112.61
Julio	23/07/2025	776	3.87	12.04	111.69
Julio	24/07/2025	752	3.85	12.52	110.72
Julio	25/07/2025	772	3.96	12.04	113.68
Julio	26/07/2025	753	3.98	12.17	112.65
Julio	27/07/2025	775	3.96	12.42	113.42
Julio	28/07/2025	768	3.92	12.22	111.35
Julio	29/07/2025	770	3.96	12.18	115.10
Julio	30/07/2025	750	3.87	12.52	111.16
Julio	31/07/2025	768	3.99	12.31	114.82
Promedio		765	3.9	12.3	113.15

Nota. Parámetros de toneladas por día, ley, dilución y costo de trituración de julio del 2025

Tabla 11. *Parámetros agosto 2024*

Mes	Fecha	tpd	Ley	Dilución	USD/T
Agosto	1/08/2024	764	3.98	12.38	113.44
Agosto	2/08/2024	764	3.93	12.43	113.41
Agosto	3/08/2024	780	3.94	12.53	113.15
Agosto	4/08/2024	776	3.85	12.38	114.15
Agosto	5/08/2024	779	3.86	12.24	113.55
Agosto	6/08/2024	771	3.92	12.08	114.97
Agosto	7/08/2024	752	3.84	12.24	115.26
Agosto	8/08/2024	770	3.91	12.42	112.61
Agosto	9/08/2024	755	3.98	12.07	110.78
Agosto	10/08/2024	755	3.97	12.34	113.46
Agosto	11/08/2024	750	3.94	12.14	114.88
Agosto	12/08/2024	768	3.95	12.11	110.73
Agosto	13/08/2024	769	3.91	12.18	114.55
Agosto	14/08/2024	771	3.88	12.40	113.94
Agosto	15/08/2024	784	3.98	12.17	112.39
Agosto	16/08/2024	757	3.91	12.19	110.81
Agosto	17/08/2024	771	3.91	12.31	111.33
Agosto	18/08/2024	769	3.86	12.08	114.73
Agosto	19/08/2024	751	3.87	12.33	113.34
Agosto	20/08/2024	758	3.80	12.60	111.25
Agosto	21/08/2024	787	3.99	12.54	112.62
Agosto	22/08/2024	780	3.85	12.36	111.92
Agosto	23/08/2024	753	3.93	12.00	113.61
Agosto	24/08/2024	781	3.94	12.30	110.87
Agosto	25/08/2024	757	3.82	12.30	111.62
Agosto	26/08/2024	768	3.80	12.42	111.02
Agosto	27/08/2024	785	3.98	12.47	114.55
Agosto	28/08/2024	780	3.95	12.27	110.24
Agosto	29/08/2024	784	3.99	12.45	111.93
Agosto	30/08/2024	770	3.87	12.01	112.98
Agosto	31/08/2024	782	3.92	12.00	111.96
Promedio		769	3.9	12.3	112.78

Nota. Parámetros de toneladas por día, ley, dilución y costo de trituración de agosto del 2024.

Tabla 12. *Parámetros septiembre 2024*

Mes	Fecha	tpd	Ley	Dilución	USD/T
Septiembre	1/09/2025	776	3.80	12.20	111.63
Septiembre	2/09/2025	776	3.99	12.21	114.84
Septiembre	3/09/2025	786	3.99	12.25	115.36
Septiembre	4/09/2025	771	3.98	12.04	113.84
Septiembre	5/09/2025	774	3.86	12.00	114.39
Septiembre	6/09/2025	785	3.90	12.16	114.85
Septiembre	7/09/2025	784	3.84	12.39	112.73
Septiembre	8/09/2025	769	3.80	12.03	113.54
Septiembre	9/09/2025	754	3.91	12.58	115.41
Septiembre	10/09/2025	785	3.80	12.48	113.91
Septiembre	11/09/2025	771	3.88	12.16	110.47
Septiembre	12/09/2025	783	3.90	12.08	113.85
Septiembre	13/09/2025	773	3.96	12.45	110.90
Septiembre	14/09/2025	750	3.95	12.02	111.72
Septiembre	15/09/2025	783	3.96	12.07	111.74
Septiembre	16/09/2025	752	3.91	12.47	112.95
Septiembre	17/09/2025	754	3.83	12.20	110.15
Septiembre	18/09/2025	767	3.83	12.39	112.51
Septiembre	19/09/2025	764	3.97	12.44	115.07
Septiembre	20/09/2025	752	3.87	12.15	111.68
Septiembre	21/09/2025	783	3.99	12.40	110.10
Septiembre	22/09/2025	759	3.82	12.08	113.27
Septiembre	23/09/2025	782	3.90	12.53	112.85
Septiembre	24/09/2025	757	3.87	12.19	113.75
Septiembre	25/09/2025	761	3.95	12.13	114.24
Septiembre	26/09/2025	764	3.80	12.39	111.40
Septiembre	27/09/2025	786	3.84	12.38	115.09
Septiembre	28/09/2025	773	3.96	12.58	115.06
Septiembre	29/09/2025	761	3.89	12.06	114.28
Septiembre	30/09/2025	785	3.95	12.38	114.50
Promedio		771	3.9	12.3	113.20

Nota. Parámetros de toneladas por día, ley, dilución y costo de trituración de septiembre del 2024.

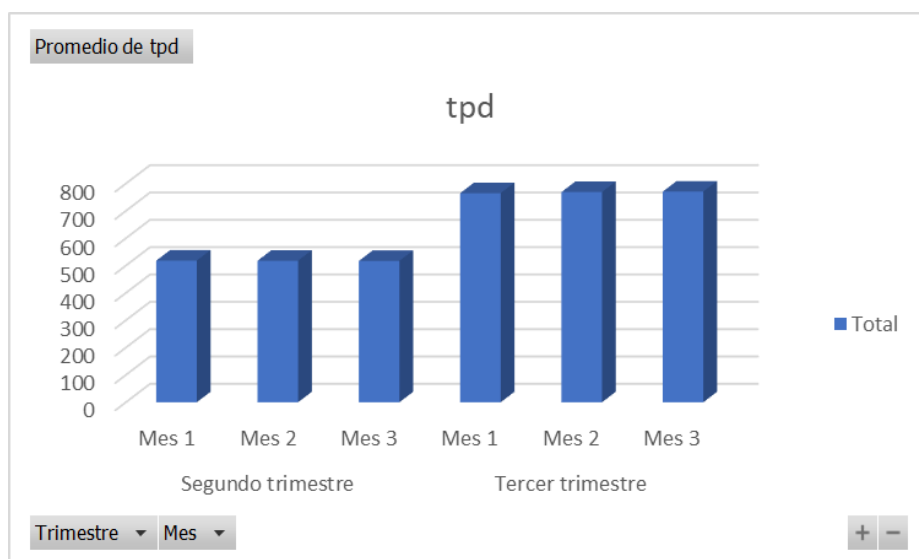


Figura 9 — Producción por día mensual

Nota. Producción por día de los meses del segundo vs tercer trimestre del 2025.

3.5.7 Comentario del Gráfico: Promedio de TPD – Segundo y Tercer

Trimestre

El gráfico muestra la comparación del promedio de toneladas por día (TPD) entre el segundo y tercer trimestre del año 2025, evidenciando el impacto positivo de la implementación del bypass 244 SE paralelo a la estructura mineralizada en la Unidad Minera Sierra Antapite.

Durante el segundo trimestre, los valores de TPD se mantuvieron relativamente constantes, con un promedio de 518 toneladas por día en los tres meses analizados. Este comportamiento refleja una baja continuidad operativa y limitaciones en la recuperación del mineral, debido a la falta de conexión efectiva entre cámaras y rellenos.

Tras la implementación del bypass en el tercer trimestre, se observa un aumento significativo en la producción diaria, alcanzando promedios de 765, 769 y 771 TPD para los meses 1, 2 y 3 respectivamente. Este incremento representa una mejora del 48.40 % en la productividad, resultado de la mayor conectividad estructural que permitió optimizar la secuencia de minado y reducir los tiempos muertos.

La tendencia ascendente y sostenida del gráfico confirma que la mejora aplicada generó una operación más continua, estable y eficiente, validando la efectividad técnica del bypass 244 SE como una solución operativa para incrementar la recuperación de mineral y reducir las pérdidas en el proceso de explotación subterránea.

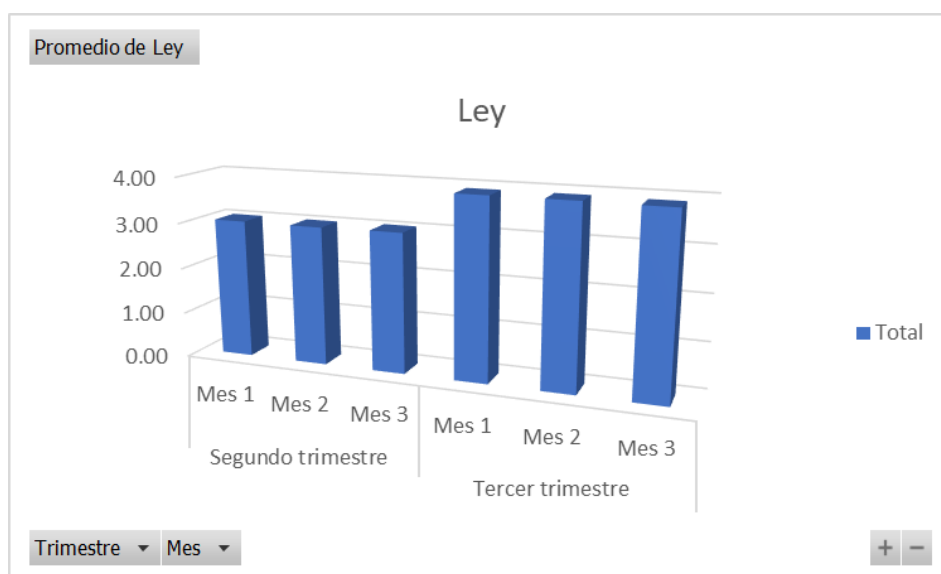


Figura 10 — Ley mensual

Nota: ley de los meses del segundo vs tercer trimestre del 2025.

3.5.8 Comentario del Gráfico: Promedio de Ley – Segundo y Tercer

Trimestre

El gráfico muestra la variación del promedio de ley del mineral (g/t Au) entre el segundo y tercer trimestre del año 2025, evidenciando el impacto directo de la implementación del bypass 244 SE paralelo a la estructura mineralizada en la Unidad Minera Sierra Antapite.

Durante el segundo trimestre, la ley promedio del mineral se mantuvo estable alrededor de 3.03 g/t Au, reflejando un aprovechamiento limitado de las zonas de alta concentración debido a la falta de conectividad entre cámaras y al control deficiente en la recuperación del relleno. Este escenario ocasionaba una mayor mezcla con material estéril, reduciendo la calidad del mineral extraído.

Tras la mejora implementada en el tercer trimestre, se observa un incremento sostenido en la ley del mineral, alcanzando valores promedio de 3.91 g/t Au. Este aumento del 28.99 % demuestra una mayor selectividad en la extracción, gracias a la orientación paralela del bypass a la estructura mineralizada, que permitió acceder con precisión a sectores de mayor tenor aurífero y reducir la dilución.

La tendencia ascendente del gráfico confirma que la recuperación del relleno controlada y alineada a la geometría del cuerpo mineralizado favoreció la calidad del mineral recuperado, fortaleciendo el rendimiento metalúrgico y la eficiencia del proceso minero. En síntesis, el incremento de la ley evidencia la eficacia técnica y operativa del bypass 244 SE en la optimización del método Sublevel Stopping aplicado en la mina.

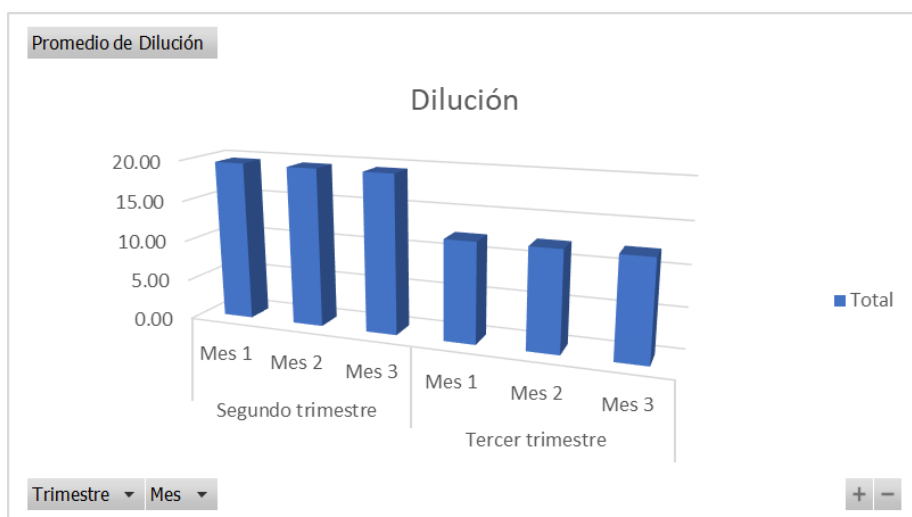


Figura 11 — Dilución mensual

Nota. Dilución de los meses del segundo vs tercer trimestre del 2025.

3.5.9 Comentario del Gráfico: Promedio de Dilución – Segundo y Tercer Trimestre

El gráfico muestra la evolución del promedio de dilución (%) entre el segundo y tercer trimestre del año 2024, comparando el comportamiento del proceso antes y después de la implementación del bypass 244 SE paralelo a la estructura mineralizada en la Unidad Minera Sierra Antapite.

Durante el segundo trimestre, los valores de dilución se mantuvieron elevados, con un promedio de 19.5 %, evidenciando un escaso control en la selectividad de extracción y una alta incorporación de material estéril en la mezcla de mineral recuperado. Este comportamiento se asocia a la falta de continuidad estructural entre cámaras y al limitado control del proceso de recuperación del relleno, lo que afectaba directamente la calidad y la ley del mineral extraído.

En el tercer trimestre, tras la implementación del bypass, se observa una disminución significativa en la dilución, alcanzando un promedio de 12.27 %, lo que representa una reducción del 37.08 % respecto al periodo anterior. Este descenso refleja una mayor precisión en la recuperación del relleno, así como una mejor definición de los límites entre zonas mineralizadas y estériles.

La tendencia descendente del gráfico demuestra que la orientación paralela del bypass a la estructura mineralizada permitió controlar de manera más eficiente la extracción, minimizando la mezcla de material sin valor económico y mejorando la calidad del mineral enviado a planta. En consecuencia, la reducción de la dilución no solo incrementó la selectividad y eficiencia del método Sublevel Stoping, sino que también contribuyó a la optimización económica y metalúrgica de la operación minera.

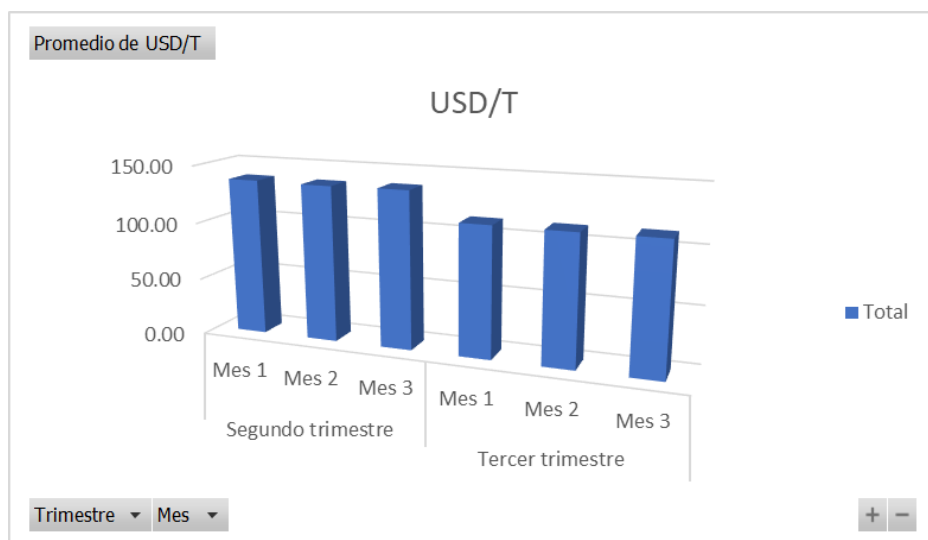


Figura 12 — Costo por tonelada de extracción mensual

Nota. Costo por tonelada de extracción de los meses del segundo vs tercer trimestre del 2025.

3.5.10 Comentario del Gráfico: Promedio de Costo Unitario (USD/T) – Segundo y Tercer Trimestre

El gráfico presenta la comparación del promedio del costo unitario por tonelada (USD/T) entre el segundo y tercer trimestre del año 2025, evidenciando la influencia positiva de la implementación del bypass 244 SE paralelo a la estructura mineralizada en la Unidad Minera Sierra Antapite.

Durante el segundo trimestre, los costos unitarios se mantuvieron elevados, con un promedio de 136.59 USD/T, reflejando una baja eficiencia operativa asociada a la falta de continuidad en el flujo de extracción y a las pérdidas de mineral provocadas por una recuperación del relleno poco controlada. Este escenario generaba mayores retrabajos, sobreexcavaciones y consumo adicional de recursos, incrementando los costos de producción.

En el tercer trimestre, tras la puesta en marcha del bypass, se observa una reducción notable de los costos unitarios, alcanzando un promedio de 113.04 USD/T, lo que representa una disminución del 17.24 % respecto al periodo anterior. Esta reducción se debe a la mayor productividad (aumento del 48.40 % en TPD), a la disminución de la dilución (–37.08 %) y a la optimización del ciclo de minado y recuperación del relleno, lo que permitió aprovechar de forma más eficiente los recursos operativos y energéticos.

La tendencia descendente del gráfico evidencia que la mejora en la secuencia operativa y la conectividad estructural aportadas por el bypass 244 SE generaron un impacto económico directo, haciendo el proceso más rentable y sostenible. En conclusión, la implementación del

bypass no solo mejoró la recuperación del mineral, sino que también fortaleció la gestión de costos y la eficiencia global del método Sublevel Stoping en la operación subterránea.

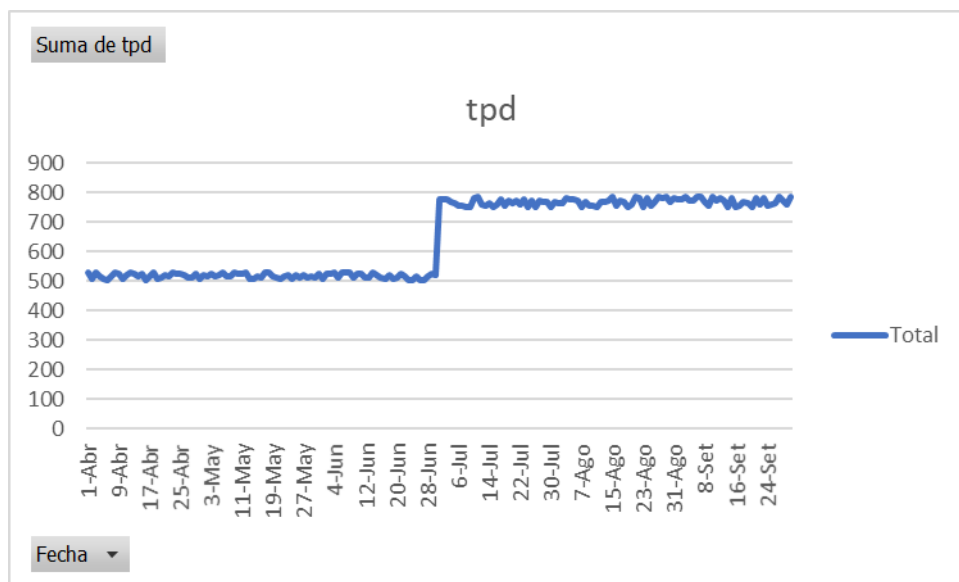


Figura 13 — Toneladas por día

Nota. Toneladas por día del segundo y tercer trimestre del 2025.

3.5.11 Resultado: tpd – Toneladas por día de extracción de mineral

Sustancial incremento en el rendimiento tpd (toneladas recuperadas por día) tras mejorar el proceso de recuperación del relleno. Durante el segundo trimestre la tpd promedio fue de 518 tpd y durante el tercer trimestre alcanzó 768 tpd, o sea, un aumento del 48.40 % del rendimiento tpd en el tercer trimestre respecto al segundo. Estos resultados evidencian que el rediseño del método Sublevel Stoping paralelo a la estructura permitió una mayor continuidad operativa, menores interferencias y mayor aprovechamiento del material remanente entre cámaras, lo que permitió una mejor recuperación del mineral recuperado.

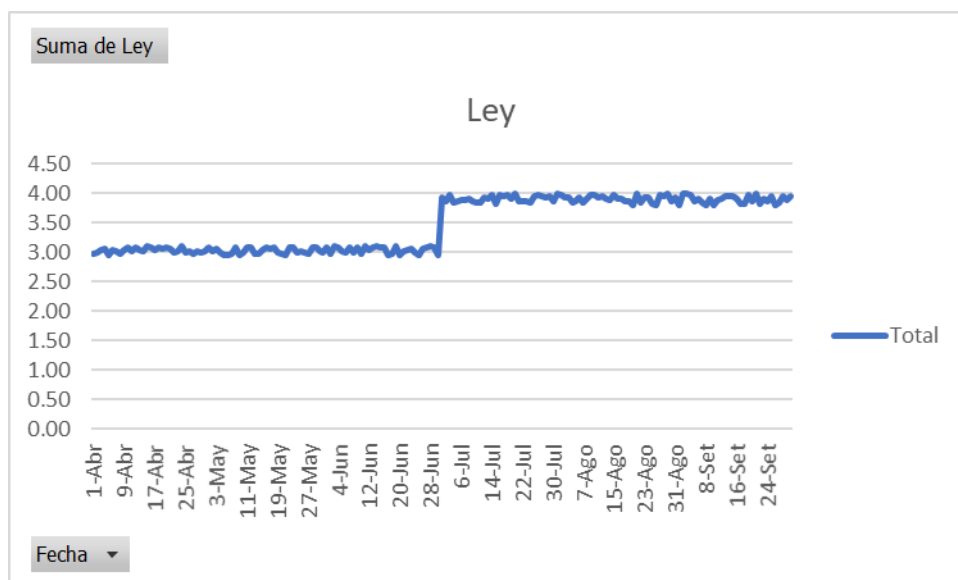


Figura 14 — Ley por día

Nota. Ley del segundo y tercer trimestre del 2025.

3.5.12 Resultado: Ley (g/t Au) – ley del mineral de Au

La ley del mineral en gramos por tonelada de oro, g/t Au, se mejoró considerablemente a lo largo del periodo de intervención; la ley alcanzó 3.0 g/t en el segundo trimestre, creciendo hasta 3.9 g/t en el trimestre tres, es decir, un aumento del 28.99 %. Lo cual indica que el nuevo proceso de recuperación del relleno permitió acceder a áreas de alta ley con mayor precisión, evitando el contacto con material estéril y disminuyendo la pérdida de mineral en el proceso de la extracción.

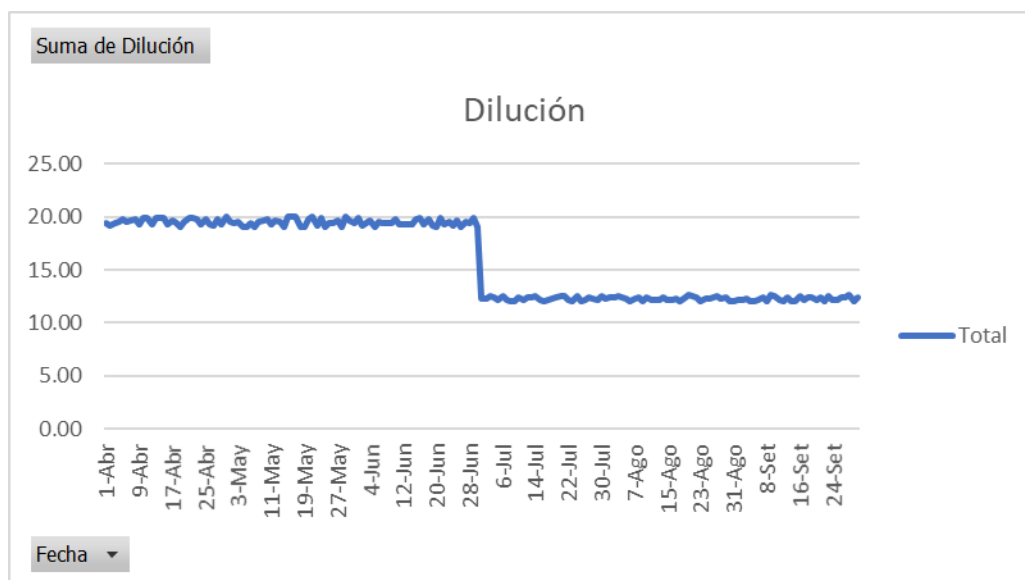


Figura 15 — Dilución por día

Nota. Dilución del segundo y tercer trimestre del 2025.

3.5.13 Resultado: Dilución (%) del Mineral

Uno de los logros del rediseño del proceso fue la reducción de la dilución de un 19.5 % en el segundo trimestre al 12.3 % del trimestre tres, lo que representó una mejora del 37.08 %. Esta mejora está íntimamente relacionada con una mejor secuencia de extracción y mejor control sobre los límites de la estructura del cuerpo mineralizado. La extracción paralela a la estructura contribuyó a evitar el ingreso de material estéril y conservar con selectividad el contacto mineral–relleno.

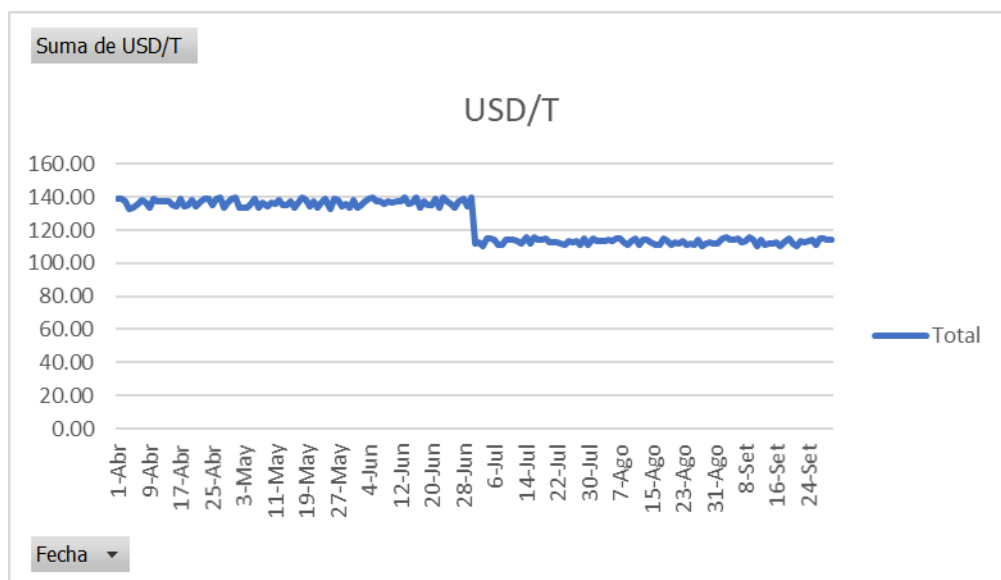


Figura 16 — Costo por tonelada de extracción por día

Nota. Costo por tonelada de extracción del segundo y tercer trimestre del 2025.

3.5.14 Resultado: USD/T (Costo por tonelada recuperada)

El costo por tonelada de mineral extraído fue otra mejora que se evidenció en su reducción del 17.24 % esto es: pasó de USD 136.596 a USD 113.043 entre el segundo y el tercer trimestre. La mejora económica fue la consecuencia de una mejor recuperación del mineral, natal a la disminución del retrabajo y a la optimización de los recursos operativos necesarios para manejo del relleno. La mejora de la continuidad y la fluidez en la secuencia de extracción mejoró los costos unitarios, asegurando la rentabilidad del método aplicado.

Tabla 13. *Validación del modelo experimental*

	tpd	Ley	Dilución	USD/T
Mes 1	644	3.5	15.9	124.785
Segundo trimestre	518	3.0	19.6	136.804
Tercer trimestre	765	3.9	12.3	113.154
Mes 2	643	3.5	15.9	124.437
Segundo trimestre	518	3.0	19.5	136.098
Tercer trimestre	769	3.9	12.3	112.775
Mes 3	644	3.5	15.9	125.044
Segundo trimestre	517	3.0	19.5	136.886
Tercer trimestre	771	3.9	12.3	113.201
Total general	644	3.47	15.87	124.752
Variación Mes 1	47.62%	29.23%	-37.33%	-17.29%
Variación Mes 2	48.51%	29.46%	-36.97%	-17.14%
Variación Mes 3	49.07%	28.29%	-36.96%	-17.30%
Segundo Trimestre	518	3.0	19.5	136.596
Tercer Trimestre	768	3.9	12.3	113.043
Variación 2 vs 3 trimestre	48.40%	28.99%	-37.08%	-17.24%

Nota. Resultados de las pruebas de validación del modelo experimental.

3.5.15 Comentarios resultados generales

Los resultados alcanzados en este capítulo evidencian que la inclusión de mejoras en el proceso de recuperación del relleno, utilizando una aproximación paralela, hacia la estructura mineralizada, generó impactos positivos significativos en los indicadores técnicos y económicos de la operación subterránea. El aumento del 48,40 % en las toneladas por día (tpd) demuestra, indudablemente, una mayor eficiencia operativa en la extracción del mineral; el incremento del 28,99 % de la ley del mineral, en consecuencia, ofrece evidencias sobre el mejor aprovechamiento de zonas de alta concentración de metal. Del mismo modo, y en esto último, la dilución se vio reducida en un 37,08 %, lo que implicó una mejora sustancial en la selectividad del proceso y en la calidad del mineral extraído, pastel en el caso de una menor dilución, en relación directa con un mayor control en la definición de límites de extracción y de secuencias de la recuperación del relleno. En el terreno económico, la mejora en la

eficiencia del proceso ayudó a reducir el costo por tonelada extraída en un 17,24 %, lo que a su vez arroja evidencias de un mejor aprovechamiento de los recursos operativos y de una mejor productividad del sistema mina. En el conjunto de los resultados logrados, es evidente que validan la mejora implementada en el Sublevel Stopping, y sobre todo, el interés de considerar la orientación estructural del cuerpo mineralizado para maximizar la recuperación y minimizar las pérdidas. El tipo de análisis que aquí se ha desarrollado es una buena entrada para adoptar el camino del resto de operaciones subterráneas con características geológicas similares.

3.5.16 Contrastación de Hipótesis

La contrastación de las hipótesis se realizó a partir del análisis comparativo de los indicadores técnicos y económicos antes y después de la implementación del bypass 244 SE paralelo a la estructura mineralizada en la Unidad Minera Sierra Antapite. El estudio se desarrolló bajo un diseño cuasi-experimental longitudinal, contrastando los resultados del segundo trimestre (sin mejora) frente al tercer trimestre (con mejora) del año 2024, evaluando las variables toneladas por día (TPD), ley del mineral (g/t Au), dilución (%) y costo unitario (USD/T).

3.5.17 Hipótesis general

H_0 (Hipótesis nula): La implementación del bypass 244 SE paralelo a la estructura mineralizada no optimiza significativamente la recuperación de mineral en la Unidad Minera Sierra Antapite.

H_1 (Hipótesis alterna): La implementación del bypass 244 SE paralelo a la estructura mineralizada optimiza significativamente la recuperación de mineral en la Unidad Minera Sierra Antapite.

Contrastación: Los resultados obtenidos confirman la hipótesis alterna (H_1), al evidenciar una mejora integral en todos los indicadores operativos. La producción diaria aumentó de 518 TPD a 768 TPD (+48.40 %); la ley del mineral se incrementó de 3.03 g/t a 3.91 g/t (+28.99 %); la dilución disminuyó de 19.51 % a 12.27 % (-37.08 %); y el costo unitario bajó de 136.59 USD/T a 113.04 USD/T (-17.24 %). Estas variaciones reflejan mejoras estadística y operativamente significativas, demostrando que la implementación del bypass optimizó de manera efectiva la recuperación de mineral y la eficiencia económica del proceso minero.

3.5.18 Primera hipótesis específica

H_0 : Las deficiencias en el diseño y control del relleno no influyen significativamente en la baja recuperación de mineral en el sector 244 SE.

H_1 : Las deficiencias en el diseño y control del relleno sí influyen significativamente en la baja recuperación de mineral en el sector 244 SE.

Contrastación: Durante el segundo trimestre se evidenció una recuperación promedio de 518 TPD y una alta dilución del 19.51 %, lo que confirma que las limitaciones del diseño y control del relleno afectaban directamente la eficiencia del proceso. Con la implementación del bypass y la nueva planificación de recuperación, la producción aumentó y la dilución se redujo drásticamente. Por lo tanto, se acepta la hipótesis alterna (H_1), confirmando que las

deficiencias previas en el control del relleno fueron un factor determinante en la baja recuperación de mineral.

3.5.19 Segunda hipótesis específica

H₀: La identificación y corrección de factores geomecánicos y operativos no mejoran significativamente la eficiencia del proceso de recuperación del relleno.

H₁: La identificación y corrección de factores geomecánicos y operativos mejoran significativamente la eficiencia del proceso de recuperación del relleno.

Contrastación: Luego de corregir los parámetros geomecánicos y optimizar la secuencia de extracción, la dilución disminuyó de 19.51 % a 12.27 %, lo que representa una mejora del 37.08 %, y la ley del mineral aumentó de 3.03 g/t a 3.91 g/t. Estas mejoras son evidencia directa del impacto positivo de las correcciones técnicas aplicadas. En consecuencia, se acepta la hipótesis alterna (H₁), validando que las mejoras geomecánicas y operativas incrementaron la eficiencia y la selectividad del proceso.

3.5.20 Tercera hipótesis específica

H₀: La planificación y ejecución del ciclo de minado mediante el bypass no incrementan significativamente la recuperación efectiva de mineral ni reducen los costos unitarios.

H₁: La planificación y ejecución del ciclo de minado mediante el bypass incrementan significativamente la recuperación efectiva de mineral y reducen los costos unitarios.

Contrastación: Los resultados del tercer trimestre demuestran una reducción del costo unitario de 136.59 a 113.04 USD/T (−17.24 %) y un incremento de la productividad en 48.40 %, validando una mayor eficiencia económica y operativa. La optimización del ciclo minero, basada en la conectividad generada por el bypass, permitió una extracción continua, menor retrabajo y mejor uso de los recursos logísticos, confirmando la validez de la hipótesis alterna (H_1).

3.5.21 Conclusión de la contrastación

La evidencia empírica obtenida confirma que la implementación del bypass 244 SE paralelo a la estructura mineralizada optimizó significativamente la recuperación de mineral, mejoró la selectividad de extracción, redujo la dilución y disminuyó los costos operativos. En consecuencia, se rechazan todas las hipótesis nulas (H_0) y se aceptan las hipótesis alternas (H_1), demostrando que la mejora aplicada generó un impacto técnico y económico positivo, consolidando un modelo de recuperación más eficiente y sostenible para la Unidad Minera Sierra Antapite.

3.6 Discusiones

Los resultados obtenidos tras la implementación del bypass 244 SE paralelo a la estructura mineralizada en la Unidad Minera Sierra Antapite demuestran una mejora técnica y económica significativa en el proceso de recuperación del relleno y del mineral bajo el método Sublevel Stoping. Los indicadores comparativos entre el segundo y tercer trimestre del 2024 evidencian que la intervención generó una mayor continuidad operativa, un control más preciso de la dilución y una reducción sustancial de los costos unitarios, consolidando un proceso más eficiente y rentable.

3.6.1 Productividad y continuidad operativa

El incremento del 48.40 % en la producción diaria (de 518 a 768 TPD) confirma que el bypass 244 SE permitió una mejor conexión entre cámaras y subniveles, favoreciendo un flujo continuo de mineral y reduciendo los tiempos muertos por interferencias o reingresos innecesarios. Este resultado es coherente con lo planteado por Chacón, Morales y Díaz (2021), quienes sostienen que la continuidad en el ciclo de minado mejora la productividad y reduce los costos operativos en minería subterránea. Asimismo, la mejora en la organización del ciclo de perforación, voladura, recuperación y relleno fortaleció la eficiencia global del proceso, asegurando una mayor disponibilidad operativa de los equipos de carguío y transporte.

3.6.2 Aumento de la ley del mineral

El aumento de la ley del mineral de 3.03 g/t Au a 3.91 g/t Au (+28.99 %) demuestra que la extracción paralela a la estructura mineralizada permitió acceder con mayor precisión a las zonas de alta concentración metálica, minimizando la incorporación de material estéril. Esta tendencia concuerda con lo expuesto por Smith y Littlejohn (2018), quienes afirman que una correcta alineación del método de explotación con la geometría de la veta mejora la selectividad y la ley del mineral recuperado. El resultado refleja además una mayor eficiencia metalúrgica, pues el material procesado presenta una composición más rica, lo que optimiza la recuperación final de oro y reduce los costos de tratamiento por tonelada de mineral.

3.6.3 Reducción de la dilución

La disminución de la dilución del 19.51 % al 12.27 % (−37.08 %) constituye uno de los logros más importantes de la implementación. El nuevo diseño del bypass favoreció el

control estructural de la extracción, evitando sobreexcavaciones y pérdidas de mineral útil. Según Pérez y Loyola (2019), la dilución en minería subterránea se controla principalmente mediante una adecuada planificación de la secuencia de minado y un control riguroso del relleno, condiciones cumplidas en el presente estudio. La reducción de la dilución también tuvo un impacto directo en la ley del mineral y en la eficiencia de planta, confirmando que el bypass paralelo a la estructura no solo incrementa la producción, sino que también mejora la calidad del mineral extraído.

3.6.4 Eficiencia económica y reducción de costos

El costo unitario de extracción se redujo de 136.59 USD/T a 113.04 USD/T (-17.24 %), evidenciando un impacto económico directo derivado de la mejora en la productividad y la reducción de retrabajos. Este resultado respalda lo planteado por Torres y Vílchez (2022), quienes sostienen que la optimización de la recuperación del relleno incrementa el tonelaje útil recuperado y mejora la relación costo-beneficio en minería subterránea. Además, la eficiencia lograda en la secuencia operativa permitió reducir los tiempos de ciclo, el consumo energético y los costos asociados al mantenimiento, confirmando que la mejora implementada repercute tanto en la eficiencia técnica como en la sostenibilidad económica del proceso.

3.6.5 Estabilidad geomecánica y seguridad operacional

La orientación del bypass 244 SE paralela a la estructura mineralizada contribuyó a una mejor redistribución de esfuerzos en el macizo rocoso, manteniendo un factor de seguridad superior a 1.5, según los registros del monitoreo geotécnico. Este resultado es

consistente con los hallazgos de Díaz (2020), quien destacó que el relleno cementado y su correcta recuperación ayudan a mantener la estabilidad estructural de las cámaras, reduciendo el riesgo de colapsos y aumentando la vida útil del tajo. De esta forma, la mejora implementada no solo optimizó la recuperación de mineral, sino que también reforzó la seguridad y estabilidad del entorno de trabajo, alineándose con las buenas prácticas de minería subterránea segura recomendadas por el Ministerio de Energía y Minas del Perú (2021).

3.6.6 Impacto integral del bypass 244 SE

El análisis integral de los resultados evidencia que la implementación del bypass 244 SE paralelo a la estructura mineralizada constituye una solución técnica efectiva y replicable, que mejora la productividad, la calidad del mineral y la rentabilidad de la operación. La correlación entre los indicadores mayor TPD, mejor ley, menor dilución y reducción de costos— demuestra que la mejora no solo actúa sobre un parámetro aislado, sino que fortalece de manera sistémica todo el ciclo de minado y recuperación del relleno. En concordancia con Rojas (2014), quien concluyó que el uso de relleno cementado junto con diseños estructurales adaptados al yacimiento aumenta la vida útil y la eficiencia del sistema minero, los resultados del presente estudio validan la importancia de considerar la geometría del cuerpo mineralizado como eje del diseño operativo.

3.6.7 Conclusión de la discusión

En conjunto, los resultados obtenidos confirman que la mejora del proceso de recuperación de relleno mediante el bypass 244 SE paralelo a la estructura mineralizada generó beneficios comprobables en términos de productividad (+48.40 %), calidad del mineral

(+28.99 %), reducción de dilución (−37.08 %) y disminución de costos (−17.24 %).

La evidencia empírica y el sustento teórico de autores especializados respaldan que esta innovación representa una estrategia técnica viable y sostenible, capaz de elevar la eficiencia global del método Sublevel Stopping y servir de modelo operativo para su aplicación en otras zonas con condiciones geológicas similares dentro de la Unidad Minera Sierra Antapite.

.

CONCLUSIONES

La implementación del bypass 244 SE paralelo a la estructura mineralizada en la Unidad Minera Sierra Antapite permitió optimizar de manera significativa la recuperación de mineral, alcanzando un incremento del 48.40 % en la producción diaria (de 518 a 768 TPD). Este resultado confirma que la conectividad estructural y la secuencia de minado optimizada favorecen la continuidad operativa y reducen los tiempos improductivos del ciclo minero.

La ley promedio del mineral se incrementó de 3.03 g/t Au a 3.91 g/t Au, lo que representa una mejora del 28.99 %. Este aumento se debe a una mayor selectividad en la extracción y a la reducción de la mezcla con material estéril, lograda gracias al diseño paralelo del bypass respecto a la estructura mineralizada. Esto demuestra que la orientación geológica adecuada contribuye directamente a mejorar la calidad y el valor del mineral recuperado.

La dilución promedio se redujo de 19.51 % a 12.27 %, equivalente a una disminución del 37.08 %, lo que evidencia un mejor control operativo durante la recuperación del relleno. La reducción de la dilución permitió mejorar la eficiencia metalúrgica, disminuir el volumen de material no útil transportado y fortalecer la estabilidad geomecánica del tajo.

El costo unitario por tonelada extraída disminuyó de 136.59 USD/T a 113.04 USD/T, generando un ahorro del 17.24 %. Este resultado valida el impacto económico positivo de la mejora, producto de la mayor productividad, la reducción de retrabajos y la optimización del uso de recursos operativos, confirmando la rentabilidad del bypass implementado.

Desde el punto de vista técnico, la implementación del bypass 244 SE mejoró la distribución de esfuerzos en el macizo rocoso, incrementando la estabilidad estructural y la

seguridad operacional. El diseño paralelo al rumbo del cuerpo mineralizado permitió controlar de manera más eficiente las excavaciones y reducir los riesgos de colapso en zonas de relleno.

De manera integral, la investigación demuestra que la mejora en el proceso de recuperación del relleno mediante el bypass 244 SE constituye una solución técnica sostenible y replicable, que integra la estabilidad geomecánica, la eficiencia operativa y la optimización económica del proceso de explotación subterránea. Este modelo puede aplicarse en otros sectores con condiciones geológicas similares, contribuyendo a la mejora continua de la productividad y la rentabilidad minera en la Unidad Minera Sierra Antapite.

RECOMENDACIONES

Mantener la aplicación del bypass 244 SE en las futuras etapas de minado y recuperación del relleno, ya que su orientación paralela a la estructura mineralizada ha demostrado mejorar la continuidad operativa, aumentar la recuperación de mineral y reducir significativamente la dilución. Este modelo debe consolidarse como parte estándar del diseño operativo en los sectores con geometrías y condiciones geomecánicas similares dentro de la Unidad Minera Sierra Antapite.

Es recomendable conservar y fortalecer los parámetros de orientación geológica y el diseño paralelo establecidos en este estudio para las labores de extracción. Esta metodología debe ser estandarizada como una práctica operativa óptima para asegurar una elevada selectividad en la explotación, minimizando la mezcla con material estéril y garantizando la calidad y el valor del mineral extraído.

Se recomienda implementar un protocolo riguroso de control operativo durante la fase de recuperación del relleno, centrado en asegurar que los niveles de dilución permanezcan por debajo de los estándares históricos. Además, es fundamental llevar a cabo un monitoreo constante de la estabilidad del tajo para capitalizar las ventajas secundarias de una dilución reducida, como el aumento en la eficiencia metalúrgica y la disminución de costos asociados al transporte de material estéril.

Para fortalecer la rentabilidad del bypass implementado, se sugiere realizar auditorías regulares de los indicadores de costo unitario por tonelada extraída. Es esencial monitorear que la disminución de retrabajos y la optimización de los recursos operativos se sostengan a lo largo del

tiempo, empleando estos resultados económicos como respaldo financiero para la autorización de proyectos de infraestructura análogos en la unidad.

Se recomienda integrar los datos de la distribución de esfuerzos en el macizo rocoso obtenidos en este proyecto dentro de los mapas de riesgo geomecánico de la mina. Se debe priorizar el uso de diseños paralelos al rumbo del cuerpo mineralizado en zonas de relleno para mitigar los riesgos de colapso, garantizando así la seguridad operacional del personal y de los equipos.

Finalmente, se recomienda formalizar este modelo de optimización técnica, operativa y económica como una solución estándar y replicable dentro de la empresa. Se sugiere incentivar el desarrollo de nuevas investigaciones que evalúen la aplicación de esta misma metodología en otros sectores subterráneos de la unidad, promoviendo una cultura de mejora continua en la productividad minera.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

BIENIAWSKI, Z. (1989). Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering. Wiley-Interscience.

CAMUS, F. (2002). Economic Geology: Principles and Practice. Springer.

CLARK, L. (1998). Minimizing dilution in open stope mining. CIM Bulletin.

FLORES, L., & TORRES, A. (2021). Uso de tecnologías avanzadas en minería subterránea para la optimización del ciclo de minado. Pontificia Universidad Católica del Perú.

GALVA, E., & MATIAS, R. (2021). “Evaluación de la resistencia de relleno cementado para el análisis de la estabilidad de tajeos secundarios”, Unidad Minera Cerro Lindo. Universidad Continental, Arequipa.

GARCIA, E. (2024). “Identificación de parámetros geomecánicos para reducir el costo por metro lineal de avance de la Galería 10237 SE, minera aurífera Retamas S.A”. Universidad Continental, Arequipa.

HARMAN, H., & MUTMANSKY, J. (2002). Introductory Mining Engineering. John Wiley & Sons.

JARA, D. (2014). “Optimización de la producción minera en minería subterránea”. Universidad de Chile.

MENDOZA, J. (2022). “Diseño de armado de barrera con losa de concreto para mejorar el ciclo de minado por corte y relleno ascendente, Minera Vicus S.A.C”. Universidad Continental, Arequipa.

PENROZ, G. (2022). “Análisis de constructibilidad y puntos críticos del uso de TBM en minería de Block Caving”. Universidad de Chile, Santiago.

QUISPE, J. (2021). “Zonificación geomecánica del macizo rocoso para elección de pilar a implementar en explotación del tajo 1050 nivel 1170 cuerpo oriente”. Universidad Continental, Arequipa.

ROJAS, V. (2022). “Metodología de optimización del programa revisión B de preparación minera considerando incertidumbre operacional”. Universidad de Chile, Santiago.

TERRY, M., & JOUGHIN, W. (2018). Digital Mining Technologies and the Future of Underground Mining. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.

TOLEDO, C. (2021). “Implementación de metodología Direct Block Scheduling en preparación mina Panel Caving en corto plazo”. Universidad de Chile, Santiago.

TORRIES, T. (1998). Evaluating Mineral Projects: Applications and Misconceptions. SME.

VALENCIA, S. (2022). “Metodología de análisis de la confiabilidad de planes de desarrollo y preparación minera subterránea en corto plazo basado en simulación”. Universidad de Chile, Santiago.

CHACÓN, R., MORALES, H., & DÍAZ, F. (2021). “Optimización de ciclos operativos en minería subterránea mediante mejoras en el diseño de cámaras”. *Revista de Ingeniería de Minas*, 24(1), 45–52.

GONZÁLEZ, P., & HERRERA, A. (2020). “Gestión de la seguridad geotécnica en minas subterráneas con métodos de relleno”. *Revista Seguridad Minera*, 36(2), 33–40.

TORRES, J., & VÍLCHEZ, D. (2022). “Impacto económico de la optimización de la recuperación en minería subterránea”. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

GONZÁLEZ, P., & FLORES, J. (2020). “Planeamiento de desarrollo horizontal en minería subterránea”. Tesis de ingeniería, Universidad Nacional de San Agustín.

PERSSON, P., HOLMBERG, R., & LEE, J. (1994). *Rock Blasting and Explosives Engineering*. CRC Press.

PÉREZ, M., & LOYOLA, J. (2019). “Dilución en minería subterránea y métodos de control”. *Revista Minería y Desarrollo*, 8(2), 21–28.

RAMÍREZ, L. (2020). “Aplicación del método de explotación paralelo a estructuras geológicas en vetas angostas”. Tesis de ingeniería, Universidad Nacional del Altiplano.

TORRES, J., & VÍLCHEZ, D. (2022). “Impacto económico de la optimización de la recuperación en minería subterránea”. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

MATRIZ DE CONSISTENCIA: “Mejora en el proceso de recuperación de relleno por el método sublevel stoping mediante el ByPass 244 SE paralelo a la estructura para optimizar la recuperación de mineral – Unidad Minera Sierra Antapite, 2025”.

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	MÉTODO DE INVESTIGACIÓN
PROBLEMA GENERAL ¿De qué manera la mejora en el proceso de recuperación del relleno mediante el bypass 244 SE paralelo a la estructura mineralizada puede optimizar la recuperación de mineral en la Unidad Minera Sierra Antapite? PROBLEMAS ESPECÍFICOS • ¿Cuáles son las principales deficiencias técnicas y operativas en el proceso actual de recuperación del relleno en la Zona Zorro Rojo, Bypass 244 SE? • ¿Qué factores técnicos y geomecánicos limitan la recuperación	OBJETIVO GENERAL Proponer mejoras en el proceso de recuperación de relleno aplicado al método sublevel stoping paralelo a la estructura, con el fin de optimizar la recuperación de mineral en el tajo 244 de la mina Antapite. OBJETIVOS ESPECÍFICOS • Evaluar el nivel de recuperación de mineral y dilución en el tajo 244, considerando los resultados operativos del método sublevel stoping. • Identificar los factores técnicos, operativos y geomecánicos que afectan la eficiencia del	HIPOTESIS GENERAL La mejora en el proceso de recuperación del relleno, aplicado al método de sublevel stoping paralelo a la estructura, optimiza significativamente la recuperación del mineral en el tajo 244 de la mina Antapite. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS • El bajo nivel de recuperación de mineral en el tajo 244 se debe a deficiencias en el diseño y control del relleno utilizado en el método sublevel stoping.	VARIABLE INDEPENDIENTE X: Mejora en el proceso de recuperación del relleno. Dimensiones X1: Tipo de relleno utilizado. X2: Secuencia de perforación y voladura. X3: Parámetros de control del relleno. VARIABLE DEPENDIENTE Y: Optimización de la recuperación de mineral. Y1: % de recuperación. Y2: % de Dilución. Y3: Ton/día recuperadas.	TIPO DE INVESTIGACIÓN Aplicada NIVEL DE INVESTIGACIÓN Explicativo DISEÑO Cuasi experimental POBLACIÓN la población está compuesta por la parte Operativa de la mina Sierra Antapite. MUESTRA La muestra para la investigación en tal sentido es el Tajo 244 – ByPass 244 SE. TÉCNICA Observación Simulación

eficiente del mineral durante el proceso de recuperación de relleno? • ¿Qué mejoras operativas y de diseño pueden implementarse en el método sublevel stoping para incrementar la recuperación del mineral y reducir la pérdida en el relleno?	proceso de recuperación del relleno en la mina. • Diseñar e implementar mejoras operativas y de planificación en el proceso de recuperación del relleno, orientadas a incrementar la eficiencia del método de explotación y reducir la pérdida de mineral.	• La identificación y corrección de factores geomecánicos y operativos permite mejorar la eficiencia en la recuperación del relleno y disminuir la dilución del mineral. • La implementación de mejora técnicas en la planificación y ejecución del ciclo de minado y relleno incrementa la recuperación efectiva del mineral en zonas paralelas a la estructura.	INSTRUMENTO Registro Split Desktop
---	---	--	--

ANEXOS

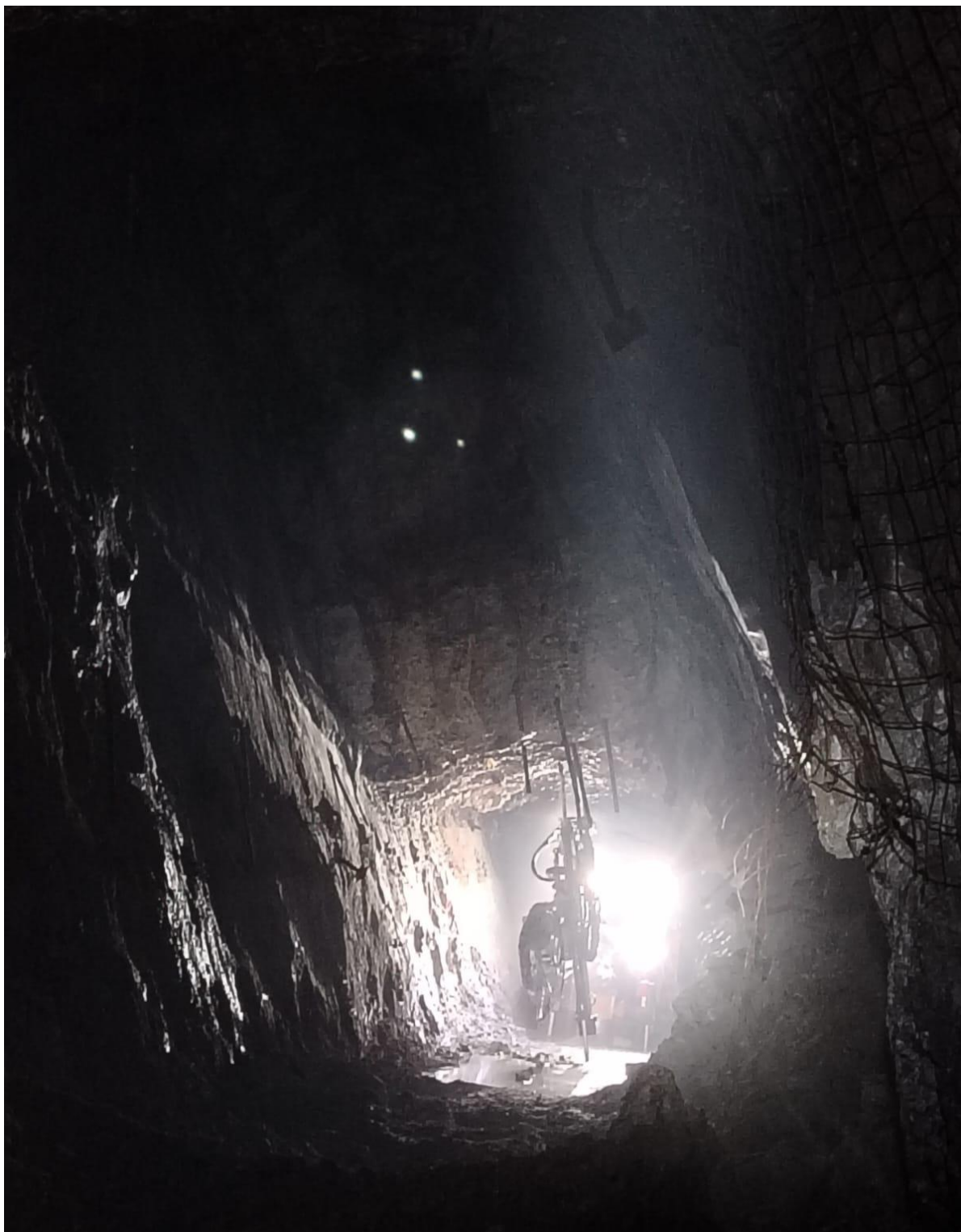


Foto 1: Perforación de Taladros Largos en veta in situ.



Foto 2: Carguío de frente en estructura mineralizada



Foto 3: Amarre de taladros.



Foto 4: Acarreo de mineral roto con ayuda de telemando (scoop de 2.2 yd).



Foto 5: Relleno de tajo explotado con desmonte (material detrítico) para mantener estabilidad de macizo rocoso.



Foto 6: Perforación de la estructura mineralizada sin control, perjudicando caja piso y techo y generando desestabilidad.



Foto 8: Resultado de una Voladura deficiente, sin control, teniendo como resultado una ventana con poca producción de mineral.



Foto 9: Conexión de Estructura mineralizada.



Foto 10: Proceso de armado de cuadro sobre estructura mineralizada.



Foto 11: Armado de cuadro sobre estructura mineralizada

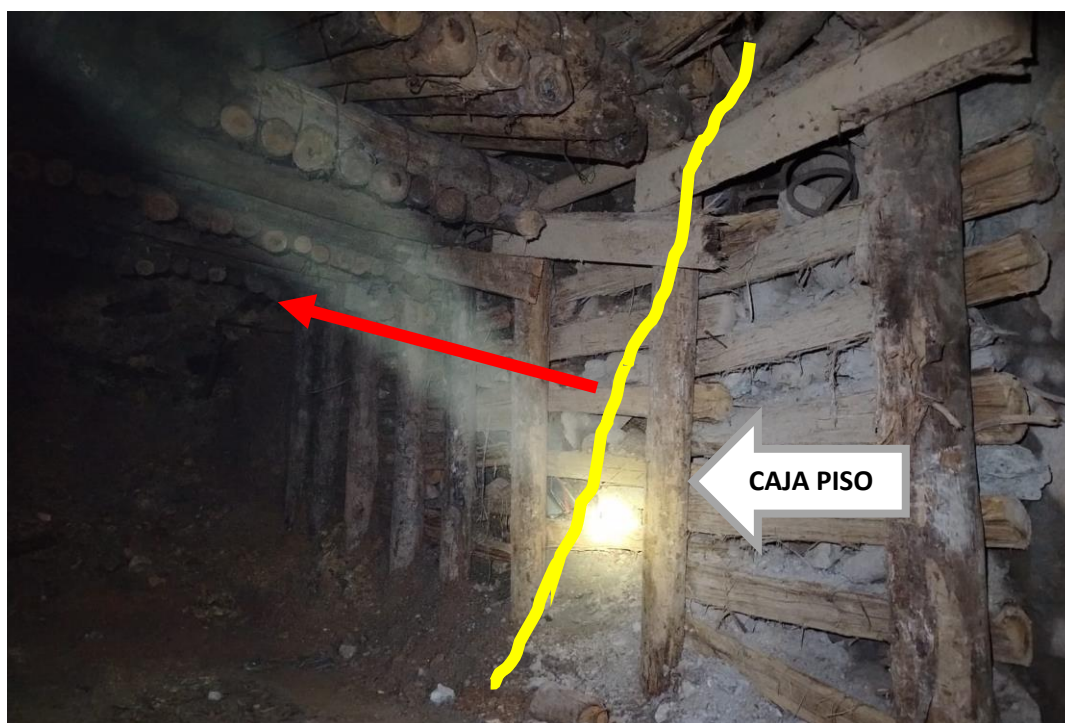


Foto 12: Armado de cuadro en toda la estructura mineralizada.



Foto 13: Armado de cuadro hasta el límite entre caja encajonante (caja techo) y estructura mineralizada



Foto 14: Perforación de estructura mineralizada.



Foto 15: Resultado de la perforación y voladura de taladros largos.



Foto 16: Resultado de la perforación y voladura controlada después de armado de cuadro sobre estructura.

**UNSCH**FACULTAD DE
INGENIERÍA
DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 41-2026-FIMGC****PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO DE MINAS**

En la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, en la ciudad de Ayacucho, en cumplimiento a la **Resolución Decanal No 223-2026-FIMGC-D**, a los **veintiséis días del mes de junio de 2026**, siendo las **4:11 p.m.**, reunidos en el **Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil**, bajo la presidencia del **Dr. Ing. Victor Felix FLORES MORENO**, y los miembros: **MSc. Ing. José Agustín ESPARTA SANCHEZ** y **MBA. Ing. Leonil Fernando QUISPE ARONES**, actuando como secretario docente el **Ing. Saul Walter RETAMOZO FERNANDEZ**, para proceder a la sustentación de tesis para optar el **Título Profesional de Ingeniero de Minas**, del Bachiller en Ciencias de la Ingeniería de Minas:

JUAN CARLOS AYALA VIZCARRA

Quien presentó la tesis denominada:

"Mejora en el proceso de recuperación de relleno por el método sublevel Stopping mediante el Bypass 244 SE paralelo a la estructura mineralizada para optimizar la recuperación de mineral - Unidad Minera Sierra Antapite, 2025"

Los señores miembros del jurado luego de expuesta la tesis y absueltas las preguntas, deliberaron y declararon:

Aprobado con 17 (diecisiete)

Siendo las **5:20 p.m.** del día **26 de junio del 2026**, culmina el acto de sustentación de tesis, y en conformidad de lo actuado los miembros del jurado firmamos al pie del presente.

Dr. Ing. Victor Felix FLORES MORENO
Presidente

MSc. Ing. José Agustín ESPARTA SANCHEZ
Miembro

MBA. Ing. Leonil Fernando QUISPE ARONES
Miembro - Asesor

Ing. Saul Walter RETAMOZO FERNANDEZ
Secretario docente de la FIMGC

FACULTAD DE INGENIERÍA
DE MINAS Y CIVIL
Av. Independencia S/N
Ciudad Universitaria
Central Tel. 066 312510
Anexo 151



UNSCH

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

El que suscribe; en mi calidad de Instructor de Originalidad de Trabajos de Investigación y encargado de certificar la originalidad de la tesis abajo indicado y por lo tanto responsable verificador de originalidad de trabajo de tesis de pregrado en primera instancia, en cumplimiento a la Resolución de Consejo Universitario N°039-2021-UNSCH-CU, Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación UNSCH, deja constancia que:

- Apellidos y Nombres del Bach. : AYALA VIZCARRA, Juan Carlos
- Escuela Profesional : Ingeniería de Minas
- Título de la Tesis : "Mejora en el proceso de recuperación de relleno por el método Sublevel Stopping mediante el Bypass 244 SE paralelo a la estructura mineralizada para optimizar la recuperación de mineral - Unidad Minera Sierra Antapite, 2025"
- Evaluación de la originalidad : 07% de similitud

Por tanto, según los artículos 12, 13 y 17 del Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación, **es procedente la constancia de originalidad** para los fines que crea conveniente.

Ayacucho, 01 de agosto de 2026

.....
MBA Ing° Leonil Fernando Quispe Aronés
Instructor de Originalidad de Trabajos de Investigación

"Mejora en el proceso de recuperación de relleno por el método Sublevel Stoping mediante el Bypass 244 SE paralelo a la estructura mineralizada para optimizar la recuperación de mineral - Unidad Minera Sierra Antapite, 2025"

por Juan Carlos AYALA VIZCARRA

Fecha de entrega: 01-ago-2026 09:47p. m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 3006709794

Nombre del archivo: TESIS_JUAN_CARLOS_AYALA_VIZCARRA.pdf (3.7M)

Total de palabras: 18225

Total de caracteres: 105559

"Mejora en el proceso de recuperación de relleno por el método Sublevel Stopping mediante el Bypass 244 SE paralelo a la estructura mineralizada para optimizar la recuperación de mineral - Unidad Minera Sierra Antapite, 2025"

INFORME DE ORIGINALIDAD

7%	7%	1%	3%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.unsch.edu.pe	2%
	Fuente de Internet	
2	repositorio.ucsm.edu.pe	2%
	Fuente de Internet	
3	Submitted to Universidad Católica de Santa María	1%
	Trabajo del estudiante	
4	hdl.handle.net	1%
	Fuente de Internet	
5	apirepositorio.unh.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
6	Submitted to Universidad Nacional de Moquegua	<1%
	Trabajo del estudiante	
7	repositorio.unh.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
8	www.coursehero.com	<1%
	Fuente de Internet	
9	repositorio.unc.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
10	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga	<1%
	Trabajo del estudiante	
11	repositorio.untumbes.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
12	GEOSTUDIOS AMBIENTALES S.A.C.. "Tercera Modificación del Plan de Cierre de Minas de la Unidad Minera Antapite-IGA0003662", R.D. N° 362-2017-MEM-DGAAM, 2020	<1%
	Publicación	
13	repositorio.upn.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	

Excluir citas
Excluir bibliografía

Activo
Activo

Excluir coincidencias

< 30 words