

Planeación, Desarrollo y Control de Contrapozos de Ventilación con Sistemas Tumi y Robbins para Reducir Temperaturas Críticas y Mejorar Condiciones Ambientales en Minería Subterránea

Planning, Development, and Control of Ventilation Raises Using Tumi and Robbins Systems to Reduce Critical Temperatures and Improve Environmental Conditions in Underground Mining

Botello-Navarro, A.A¹; Hernández-Alaniz, C.J² ✉, Ceseñas-Cordero, M.G³

Datos de Adscripción:

¹ Botello Navarro, Ana Azucena
Tecnológico Nacional de México, sede Instituto Tecnológico Superior Zacatecas Occidente.
botellonavarroanaazucena@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0001-4442-5479>

² Hernández Alaniz, Claudia Julianna
Tecnológico Nacional de México, sede Instituto Tecnológico Superior Zacatecas Occidente.
chernandez@itszo.edu.mx
<https://orcid.org/0000-0002-0611-061X>

³ Ceseñas Cordero, María Guadalupe
Tecnológico Nacional de México, sede Instituto Tecnológico Superior Zacatecas Occidente.
mgcesenas@itszo.edu.mx
<https://orcid.org/0000-0002-2863-617X>

Resumen. La ventilación en la minería subterránea es un factor esencial para garantizar la seguridad laboral, la salud ocupacional y la eficiencia operativa. En minas profundas se identifican limitaciones en los sistemas convencionales de ventilación, lo que provoca temperaturas elevadas, acumulación de gases nocivos y condiciones ambientales adversas para los trabajadores. Con el fin de atender esta problemática, se implementaron contrapozos de ventilación mediante tecnologías de perforación vertical (Raise Boring), utilizando equipos Tumi y Robbins, con el propósito de optimizar el flujo de aire, reducir el calor acumulado y diluir los contaminantes. El estudio se desarrolló bajo un enfoque metodológico mixto, con un diseño cuasiexperimental longitudinal, integrando mediciones psicrométricas, análisis de caudal, monitoreo de gases y observación operativa en campo. Los resultados mostraron una mejora significativa en los parámetros ambientales, con una disminución de las temperaturas extremas, un incremento de la concentración de oxígeno y una reducción de gases nocivos como el monóxido de carbono y los óxidos de nitrógeno. Asimismo, se observó un aumento de la eficiencia operativa y del cumplimiento de la NOM-023-STPS-2012, que regula las condiciones de seguridad en minas subterráneas. La investigación concluye que los sistemas Raise Boring, cuando se planifican y supervisan adecuadamente, representan una solución viable, segura y costo-eficiente para la ventilación en minas profundas sometidas a contextos geotérmicos exigentes. Además, se destaca su potencial de replicabilidad en otras operaciones mineras, lo

que contribuye a la sostenibilidad ambiental, a la reducción de riesgos laborales y a la mejora continua de la productividad.

Palabras clave: Eficiencia Operativa, Minería Subterránea, Raise Boring, Seguridad Laboral, Ventilación Minera.

Abstract - Ventilation in underground mining is a critical factor to ensure occupational safety, worker health, and operational efficiency. In deep mining operations, conventional ventilation systems often present limitations, resulting in elevated temperatures, accumulation of hazardous gases, and adverse environmental conditions for workers. To address this issue, ventilation raises were implemented using vertical raise-boring technology, specifically with Tumi and Robbins equipment, to optimize airflow, reduce heat buildup, and dilute contaminants.

The study used a mixed-methods approach with a longitudinal quasi-experimental design, integrating psychrometric measurements, airflow analysis, gas monitoring, and in-field operational observations. The results showed significant improvements in environmental parameters, including reduced extreme temperatures, increased oxygen concentration, and lower levels of harmful gases such as carbon monoxide and nitrogen oxides. Additionally, the study observed improved operational efficiency and compliance with Mexican regulation NOM-023-STPS-2012, which governs safety conditions in underground mining.

The research concludes that raise boring systems, when properly planned and supervised, represent a viable, safe, and cost-efficient solution for ventilation in deep mines under demanding geothermal conditions. Furthermore, it highlights their potential for replication in other mining operations, contributing to environmental sustainability, risk reduction, and continuous productivity improvement.

Keywords: Mine Ventilation, Occupational Safety, Operational Efficiency, Raise Boring, Underground Mining.

I. INTRODUCCIÓN

La ventilación subterránea es fundamental en las minas, ya que no solo garantiza una atmósfera segura y saludable para los trabajadores, sino que también incide en la eficiencia de las operaciones mineras. En minas profundas, el control de la temperatura es particularmente crítico debido a la elevada temperatura generada por la proximidad a la corteza terrestre y al calor residual de los procesos de extracción. Los sistemas de ventilación son esenciales no solo para regular la temperatura, sino también para eliminar gases tóxicos, polvo y otros contaminantes generados durante el proceso de perforación, voladura y transporte (Kanam y Ahmed, 2021). La falta de ventilación adecuada reduce la disponibilidad de oxígeno, lo cual aumenta la concentración de contaminantes en el ambiente, afectando la salud de los trabajadores y, por ende, la producción. Los contrapozos de ventilación son obras verticales esenciales para la distribución eficaz del aire en las minas subterráneas. Estos pozos permiten la circulación de aire entre diferentes niveles de la mina, promoviendo el reemplazo del aire viciado por aire fresco (Murphy y Milne, 2014). Además, ayudan a mantener una presión constante en el sistema de ventilación, lo cual es crucial para evitar la acumulación de gases tóxicos. En este contexto se han realizado varios estudios sobre la optimización de la ventilación subterránea y la construcción de pozos de ventilación.

Investigaciones como Pozo y Ari (2023), a través de un modelamiento del sistema de ventilación en una mina subterránea, proyectaron que en excavaciones futuras más profundas sería necesario mantener monitoreos térmicos constantes; además, identificaron la presencia de gases como SO_2 y CO_2 , producto de labores antiguas no clausuradas, proponiendo su sellado adecuado para mejorar la calidad del aire. Vargas (2020) evaluó y optimizó el sistema principal de ventilación mediante simulaciones en Ventsim™, reduciendo el número de ventiladores auxiliares y la capacidad del ventilador principal.

El método de perforación Raise Boring ha sido otro enfoque relevante en la construcción de chimeneas de ventilación. Dueñas (2023) comprobó su efectividad en una mina y mostró una alta correlación entre este método y factores como la seguridad, el control ambiental y la resistencia del macizo rocoso. Por otro lado, Ávila (2021) resaltó la importancia del equipo humano en la supervisión y ejecución de proyectos, señalando que el desempeño técnico y operativo del personal fue crucial en la correcta implementación de la máquina electrohidráulica SBM 400 para ventilación.

La ventilación también desempeña un papel esencial en la reducción de la concentración de gases tóxicos emitidos como consecuencia de las voladuras. Un estudio desarrollado por Merlé et al. (2022) propuso modelos matemáticos que permiten predecir el tiempo seguro de reingreso a las galerías tras una voladura, demostrando que un aumento del caudal de aire puede reducir considerablemente dicho tiempo, lo que mejora la productividad sin comprometer la seguridad. Asimismo, Hidalgo (2024) y Coral (2024) trabajaron en la mejora del sistema de ventilación mediante la construcción de una chimenea y la instalación de nuevos ventiladores, lo que resolvió deficiencias en niveles críticos y garantizó condiciones de trabajo seguras.

Loayza (2021), realizó un análisis de alternativas de ventilación ante deficiencias de cobertura, seleccionando una propuesta que logró una cobertura del 104% y mejoró la eficiencia energética.

Sotacuro (2023) destacó que la clasificación del macizo rocoso mediante sistemas como el Q de Barton es fundamental para la excavación segura de túneles mediante métodos convencionales con explosivos, lo que incide directamente en la planificación de la ventilación, ya que un soporte adecuado asegura la estabilidad del circuito de ventilación. Finalmente, Ibáñez y Montoya (2022) propusieron un diseño de circuito de ventilación forzada, priorizando la optimización de recursos y la simulación de condiciones ambientales para mejorar la toma de decisiones, sin requerir grandes inversiones adicionales.

Estos antecedentes evidencian que la planificación, ejecución y seguimiento de sistemas de ventilación, así como el uso de tecnologías como Tumi y Robbins deben considerar no solo factores técnicos, sino también condiciones operativas específicas, geomecánicas y humanas. La experiencia en diversas minas subterráneas del Perú y de Latinoamérica refuerza la necesidad de diseñar estrategias integrales para abordar los problemas térmicos, ambientales y de seguridad.

En la mina de estudio, los contrapozos de ventilación Tumi y Robbins se utilizan por sus características técnicas, que permiten perforaciones más rápidas y precisas en terrenos difíciles, lo que mejora la eficiencia en los tiempos de ejecución y reduce el riesgo asociado a los métodos tradicionales de voladura (Sandvik Mining and Rock Solutions, 2021).

Los sistemas de perforación vertical de Tumi y Robbins son herramientas clave en la construcción de contrapozos de ventilación. La tecnología de Raise Boring, utilizada por ambos sistemas, consiste en perforar un pozo piloto desde un nivel superior hacia un nivel inferior, seguido del ensanchamiento de este pozo hasta alcanzar el diámetro deseado, lo que permite construir pozos de gran diámetro y profundidad sin necesidad de explosivos.

El sistema Robbins Raise Boring es reconocido mundialmente por su precisión y robustez. Los pozos excavados con equipos Robbins tienen una alta tasa de penetración, lo que permite ejecutar proyectos a mayor profundidad y con mayor diámetro, características esenciales para minas profundas. Además, Robbins ofrece una amplia gama de equipos automatizados que reducen los riesgos asociados a la perforación manual y mejoran la seguridad operativa (Perrichon, 2019). Ambos sistemas, Tumi y Robbins, presentan ventajas significativas en términos de tiempo de ejecución y costos operativos frente a métodos convencionales como la voladura (Barton & Shen, 2017).

El presente estudio tiene por objetivo evaluar la implementación de estos sistemas de ventilación en una mina subterránea y analizar su impacto en la mejora de las condiciones térmicas y de la calidad del aire en zonas críticas. A través de un enfoque metodológico mixto con diseño cuasi-experimental longitudinal, se busca establecer una correlación entre las condiciones previas y posteriores a la intervención, contribuyendo así a la toma de decisiones que favorezcan un entorno laboral más seguro, eficiente y sostenible. En este contexto, el trabajo pretende responder a la pregunta de investigación: ¿La implementación de contrapozos de ventilación mediante los equipos Tumi y Robbins mejora significativamente las condiciones térmicas y de calidad del aire en las zonas subterráneas críticas de una mina subterránea?

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

El desarrollo de este estudio fue posible gracias a la consideración de elementos sustanciales en el proceso metodológico, lo que permitió garantizar la validez y la sistematicidad de la información.

2. Metodología

El enfoque utilizado en la investigación corresponde a un diseño mixto, según lo planteado por Hernández, Fernández y Baptista (2014), considerado uno de los métodos más completos por su capacidad para integrar datos cualitativos y cuantitativos. Esta combinación permitió obtener una visión integral de las condiciones de ventilación en la mina, al reunir información objetiva y técnica con una comprensión contextual de los problemas de seguridad y ventilación, ofreciendo así una interpretación más completa del impacto de la implementación de los contrapozos Tumi y Robbins.

Desde el enfoque cuantitativo, se analizaron variables medibles, como temperaturas en distintas zonas subterráneas, niveles de concentración de gases (CO) y caudales de aire, antes y después de la intervención, utilizando instrumentos como Kestrel y software especializado como Ventsim, con el propósito de comprobar hipótesis mediante la comparación de resultados. Por su parte, el enfoque cualitativo permitió examinar las percepciones de los trabajadores sobre las condiciones laborales y la seguridad, considerar aspectos operativos como la planificación de obras y las decisiones técnicas, así como interpretar informes normativos —por ejemplo, el cumplimiento de la NOM-023-STPS-2012— que, aunque no pueden medirse directamente, aportan profundidad al análisis del contexto operativo de la mina. El componente cualitativo del estudio se fundamentó en la observación operativa en campo y el análisis de las percepciones de riesgo del personal. Se realizaron recorridos técnicos para documentar el estado físico de la infraestructura (mangas rotas y mal alineadas) y se consideraron los reportes de seguridad sobre fatiga laboral y paros por tarjetas rojas como indicadores de la necesidad de intervención.

El diseño adoptado fue cuasiexperimental de tipo longitudinal, ya que permite evaluar los efectos de una intervención específica —la construcción de contrapozos con equipos Tumi y Robbins— a lo largo del tiempo, sin requerir asignación aleatoria de grupos ni control absoluto de las condiciones operativas. De acuerdo con Hernández et al. (2014), los diseños longitudinales “recolectan datos en diferentes momentos o periodos para hacer inferencias respecto al cambio, sus determinantes y consecuencias”.

Dado que no se formaron grupos de control y se trabajó con áreas problemáticas previamente definidas, el diseño se estructuró bajo un esquema de medición *pretest* y *posttest* en un solo grupo. La unidad de análisis fue las zonas subterráneas intervenidas, donde se documentaron las condiciones previas y posteriores a la construcción de los contrapozos. Este enfoque permitió identificar y atribuir razonablemente los cambios observados —mejoras en ventilación, temperatura y seguridad— a la intervención realizada, sin necesidad de establecer condiciones artificiales de laboratorio, lo cual resulta adecuado para el entorno operativo complejo de una mina en funcionamiento.

2.1 Población y muestra

La población en estudio comprende todas las zonas subterráneas de la mina, especialmente aquellas en las que se realizan actividades de producción y operación minera, donde el sistema de ventilación tiene un impacto directo en las condiciones térmicas y de seguridad laboral. La muestra está limitada al subconjunto de zonas subterráneas que presentan mayores deficiencias en la ventilación, temperaturas elevadas y acumulación de gases contaminantes. Estas zonas fueron seleccionadas específicamente para la implementación de los contrapozos Tumi y Robbins.

La selección se llevó a cabo según criterios de inclusión, como las áreas subterráneas con maquinaria diésel en operación, reportes técnicos con temperaturas superiores al umbral permitido para el trabajo continuo, problemas documentados de acumulación de gases contaminantes (CO, NOx), así como la baja circulación del aire, verificada mediante mediciones de caudal. Además de la accesibilidad para la construcción de contrapozos de ventilación. Se excluyeron zonas de la mina sin actividad minera durante el periodo en estudio, así como áreas con ventilación previamente optimizada o en condiciones adecuadas de calidad del aire y temperatura.

El método de muestreo fue no probabilístico por criterios (intencional), seleccionando deliberadamente las zonas subterráneas que cumplieran con los criterios de inclusión, con base en los reportes técnicos de ventilación, temperatura y condiciones operativas.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se muestra el equipo utilizado en la implementación de los contrapozos.

Figura 1

Máquina Tumi SBM 300 y Máquina Robbins 61



En la Figura 1 se muestra la comparación de equipos utilizados en la construcción de contrapozos de ventilación: a la izquierda, la máquina Tumi SBM 300; a la derecha, la máquina Robbins 61. Ambas tecnologías fueron empleadas en la implementación de proyectos de ventilación subterránea, cada una con funciones específicas en la mejora de las condiciones ambientales y en la planificación estratégica.

Figura 2

Condiciones psicrométricas antes del contrapozo Tumi tomadas el 26 de abril de 2024.

Condiciones psicrométricas antes del proyecto

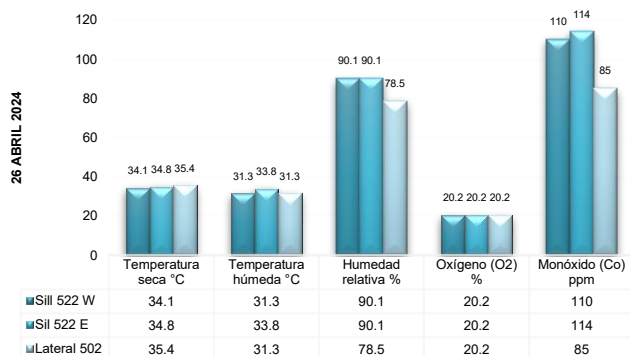
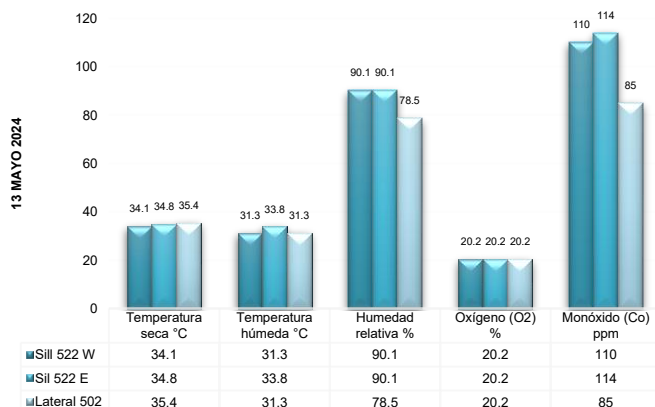


Figura 3

Condiciones psicrométricas antes del contrapozo Tumi tomadas el 13 de mayo de 2024

Condiciones psicrométricas antes del proyecto



En las mediciones iniciales (abril–mayo de 2024) observadas en las Figuras 2 y 3, los niveles de temperatura seca superaban los 34 °C, la humedad relativa alcanzaba valores cercanos al 90% y las concentraciones de monóxido de carbono superaban los 110 ppm, mientras que el oxígeno se mantenía en el límite inferior de seguridad (20.2%). Estas condiciones comprometían la salud de los trabajadores y ocasionaban retrasos en la producción.

Los planos comparativos antes y después de la intervención, mostrados en las Figuras 4 y 5, evidencian la mejora en la distribución del aire y la reactivación de las obras de producción. La correlación entre los datos psicrométricos y la operatividad minera demuestra que los contrapozos de ventilación constituyen una solución viable y costo-eficiente para garantizar condiciones seguras en ambientes subterráneos.

Figura 4

Plano con condiciones psicrométricas antes del contrapozo Tumi tomadas el 13 de mayo de 2024

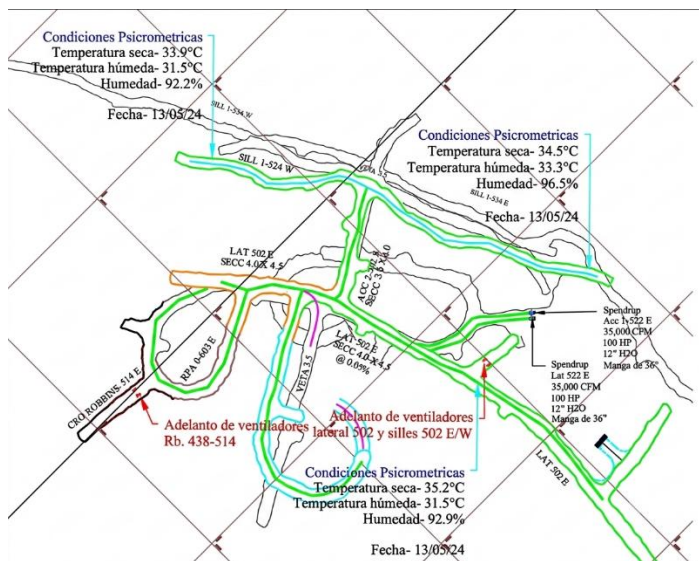
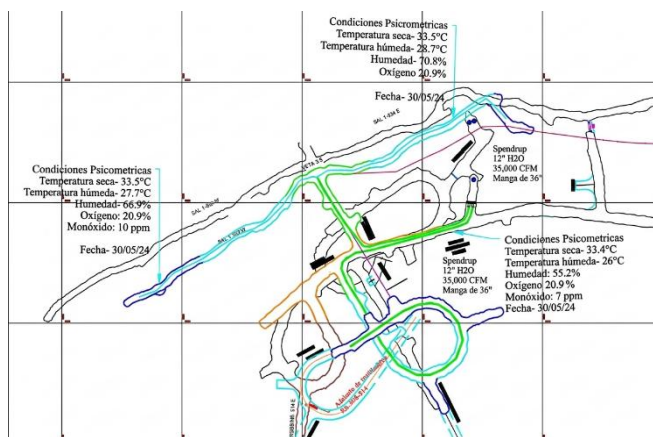


Figura 5

Plano con condiciones psicrométricas después del contrapozo de ventilación Tumi tomadas el 30 de mayo de 2024



Tras la construcción del contrapozo Tumi, los registros del 30 de mayo de 2024 muestran, en la Figura 6, una reducción de la temperatura a 33.4 °C, una disminución de la humedad relativa a 55–70% y una caída drástica del CO a menos de 20 ppm, con un incremento del oxígeno a 20.9%. Estos resultados confirman la eficacia del sistema en la dilución de gases y en la estabilización térmica de los silles del nivel 502.

Figura 6

Condiciones psicrométricas después del Proyecto tomadas el 30 de mayo 2024

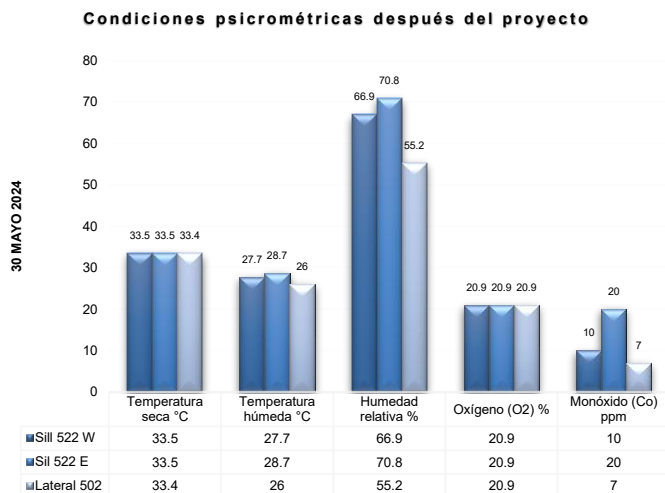


Figura 7

Plano de lateral 502 E con la nueva ubicación de ventiladores y muro terminado



En la Figura 7 se observa que se construyó de manera simultánea el muro del nivel 530 y el muro en el nivel 502, se encapsularon los ventiladores en este mismo nivel, en los cuales se utilizó uno de los ventiladores para los silles del nivel 522 y otro ventilador para la rampa positiva una vez que se terminó el contrapozo de ventilación Tumi.

Resultados operacionales

De acuerdo con las toneladas de mineral programadas para los meses de abril y mayo, fue necesario elaborar el proyecto de contrapozo Tumi 502-530, con el fin de cumplir con el tonelaje previsto y evitar retrasos ocasionados por la ventilación. Cuando los proyectos de ventilación se retrasan, las obras de producción de mineral se ven obligadas a detenerse; por ello, es fundamental que las obras de producción y las de ventilación avancen en paralelo, garantizando que las toneladas reales coincidan con las programadas. La construcción del contrapozo Tumi permitió

anticipar la ventilación y asegurar el cumplimiento del tonelaje programado, evitando pérdidas significativas de mineral.

Con la conclusión del contrapozo de ventilación Tumi, las toneladas obtenidas en el mes de abril fueron de 1346, lo que evidencia que, desde el inicio del proyecto, se logró una extracción exitosa, con 266 toneladas adicionales respecto a las planeadas en el sill 2-502 E-E. En contraste, en el sill 2-502 E-W se alcanzaron 140 toneladas reales por encima de las programadas para el mismo mes.

Durante mayo, se registraron 4 toneladas adicionales a las previstas en los silles 2-502 E-E y 2-502 E-W. A pesar de que el desarrollo del contrapozo Tumi 502-530 obligó a trabajar en ciclos, las mejoras en las condiciones psicrométricas permitieron cumplir con las metas de producción establecidas para el periodo. Los resultados se muestran en las tablas 1, 2, 3 y 4, que se encuentran en el Anexo A

Figura 8

Plano con condiciones psicrométricas antes del contrapozo Robbins nivel 438

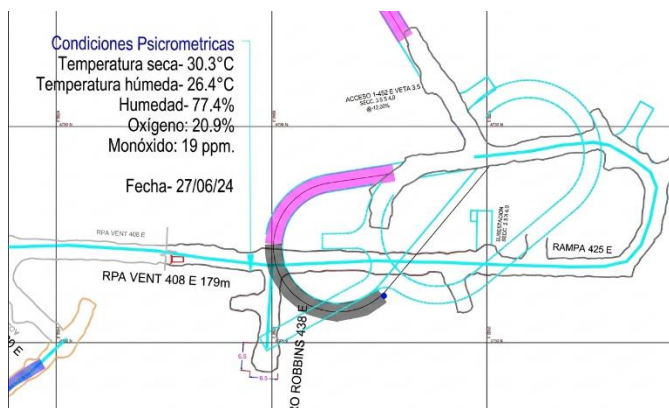


Figura 9

Plano con condiciones psicrométricas antes del contrapozo Robbins nivel 514

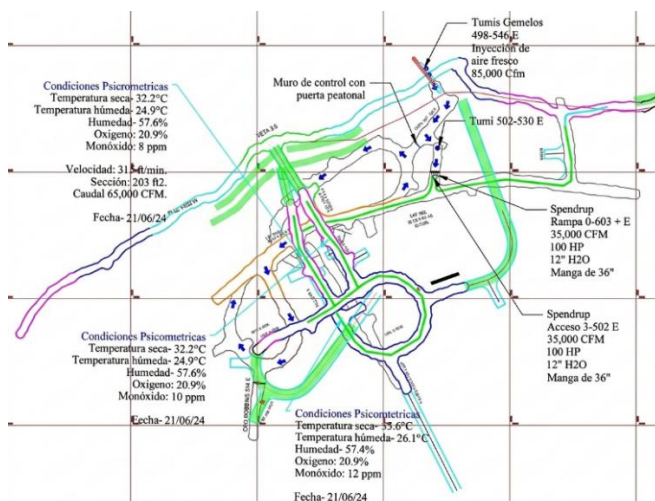
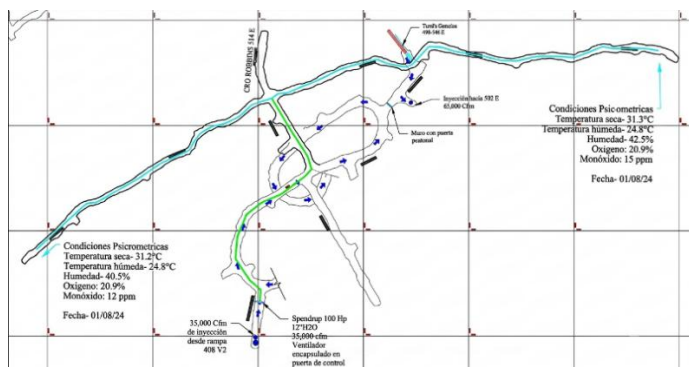


Figura 10

Plano con condiciones psicométricas después del contrapozo de ventilación Robbins, nivel 438



Si se habla de eficiencia, el contrapozo Robbins se puede considerar como un complemento estratégico más que una solución inmediata. La justificación de ello se puede observar en las Figuras 8, 9 y 10, donde las condiciones psicométricas (temperatura, humedad relativa, contenido de oxígeno) no mostraron mejoras significativas tras su implementación. Sin embargo, su importancia reside en la anticipación del flujo de ventilación hacia zonas aún en desarrollo. Con lo anterior se puede considerar que la eficiencia de Robbins se mide por su capacidad de:

- Evitar retrocesos en las condiciones logradas por Tumi 502-530.
- Facilitar el desarrollo de obras nuevas, como los cruceros y los accesos derivados de la rampa 460.
- Garantizar la continuidad de la ventilación en zonas activas y futuras, reduciendo el riesgo de acumulación de gases o temperaturas excesivas.

En los resultados operativos se observó una diferencia crucial entre el contrapozo Tumi y Robbins, ya que el primero permitió una validación técnica directamente relacionada con el impacto en la producción (por ejemplo, a través de la comparación entre toneladas planeadas y toneladas reales extraídas), en el caso del contrapozo Robbins, no puede evaluarse con ese mismo criterio debido a que más que atender urgencias de producción, el Robbins se levantó para preparar el camino; es decir, se orientó a fortalecer la infraestructura de ventilación en áreas de expansión y cuidar las condiciones logradas con el Tumi.

Por tanto, el Robbins puede considerarse un enfoque preventivo que permite mantener condiciones operativas dentro de parámetros aceptables para la salud de los trabajadores y el desempeño del equipo minero, asegurando una eficiencia sostenida a mediano y largo plazo.

Tabla 5

Costo de contrapozo Robbins

COSTO CONTRAPOZO ROBBINS			
	METROS	P.U. USD POR METRO	TOTAL
1. Robbins 438-514			
Instalación de máquina y unidades, pilotaje y rimado	74	\$1,839	\$136,086
Tiempos muertos	118 USD	Por hora.	

En la tabla 5 se muestra el costo del contrapozo Robbins y el costo de los tiempos muertos; el primero refleja una inversión considerable, pero con beneficios estratégicos a mediano plazo como una apuesta por el futuro para mantener la mina segura, bien ventilada y lista para crecer; en cambio, los tiempos muertos deben considerarse dentro del costo operativo, ya que pueden impactar la rentabilidad si se prolongan.

Los resultados obtenidos en la implementación de contrapozos de ventilación mediante Raise Boring con equipos Tumi y Robbins evidencian mejoras significativas en las condiciones ambientales de la mina subterránea. Se registró una disminución de temperaturas extremas, un incremento en la concentración de oxígeno y una reducción de gases nocivos como CO y NOx. Estos hallazgos responden directamente a la pregunta de investigación y confirman la pertinencia de implementar sistemas de Raise Boring como solución técnica y estratégica.

Estos hallazgos permiten establecer comparaciones con investigaciones previas. Tal es el caso de lo planteado por Vargas (2020), quien optimizó sistemas de ventilación reduciendo costos energéticos y alcanzando coberturas superiores al 100%. Los resultados obtenidos confirman la importancia de una adecuada planeación y supervisión de proyectos de Raise Boring que permiten no solo mejorar la cobertura, sino también garantizar condiciones térmicas seguras en zonas críticas. De manera complementaria, Dueñas (2023) comprobó la efectividad del Raise Boring en la unidad minera Alpayana, resaltando su impacto en seguridad y control ambiental; los hallazgos aquí presentados refuerzan esa evidencia al demostrar mejoras operativas y cumplimiento normativo.

Loayza (2021) sostiene que la reducción del número de ventiladores auxiliares es clave; sin embargo, los datos muestran que su impacto depende de las condiciones específicas del contrapozo. En el estudio, la implementación de los contrapozos Tumi y Robbins permitió disminuir la dependencia de equipos auxiliares, optimizar el consumo energético y mejorar la eficiencia operativa, confirmando la replicabilidad de estas soluciones en diversos escenarios de explotación minera. Asimismo, la reducción de gases tóxicos coincide con lo señalado por Merlé et al. (2022), quienes demostraron que un incremento del caudal de aire reduce los tiempos de reingreso tras las voladuras. En este caso, la construcción de contrapozos permitió una dilución más eficiente de los contaminantes, lo que mejoró la productividad sin comprometer la seguridad. Por otro lado, Hidalgo (2024) y Coral (2024) reportaron mejoras sustanciales en minas peruanas mediante la construcción de nuevas chimeneas; y los resultados aquí presentados refuerzan esa perspectiva que aporta evidencia adicional sobre la replicabilidad de estas soluciones en distintas condiciones geotérmicas.

Reforzando lo anterior Barton & Shen (2017) y Sandvik Mining and Rock Solutions (2021) mencionan la importancia y ventajas significativas del uso de los contrapozos de ventilación Tumi y Robbins debido a sus características técnicas, lo que hace más eficientes los tiempos de ejecución y costos operativos; además de reducir riesgos utilizado métodos tradicionales como la voladura.

Finalmente, se destaca que la supervisión técnica y el control de obra fueron determinantes para alcanzar los resultados, de conformidad con lo señalado por Ávila (2021) respecto al papel del equipo humano en la correcta implementación de proyectos de ventilación. La integración de planeación, control y

seguimiento permitió garantizar la eficiencia y sostenibilidad del sistema, consolidando la ventilación como un eje estratégico para la seguridad y productividad minera.

IV. CONCLUSIONES

La construcción de contrapozos de ventilación mediante tecnologías Tumi y Robbins resultó ser una alternativa confiable y medible para mejorar las condiciones térmicas extremas y la calidad del aire deficiente en zonas subterráneas críticas de la mina. Las mediciones psicométricas antes y después de las operaciones realizadas aportaron evidencia cuantitativa decisiva del éxito de la intervención: se logró reducir la temperatura seca ambiental (que superaba inicialmente los 34 °C) a un parámetro operativo seguro de 33,4 °C; del mismo modo, la humedad relativa crítica del 90% disminuyó a un rango estable entre 55% y 70%. En términos de seguridad química y atmosférica, el incremento del caudal de aire disminuyó drásticamente las concentraciones peligrosas de monóxido de carbono (CO), de más de 110 ppm a valores inferiores a 20 ppm, logrando simultáneamente estabilizar la concentración de oxígeno en 20.9%. Estas métricas validan el estricto cumplimiento de la norma mexicana NOM-023-STPS-2012, garantizando un entorno seguro y saludable para las actividades mineras subterráneas, además de anticiparse a futuras necesidades de ventilación derivadas del crecimiento operativo de la mina.

Desde una perspectiva económica, la viabilidad del proyecto quedó respaldada por la eliminación de paros por ventilación defectuosa y la maximización del rendimiento de los equipos diésel. El beneficio funcional se tradujo en la productividad de la mina: tras la interconexión del contrapozo Tumi en el nivel 502-530, se alcanzó una extracción exitosa de 1346 toneladas de mineral en el mes de abril, lo que aportó 266 toneladas adicionales en el sill 2-502 E-E y 140 toneladas adicionales sobre lo planeado en el sill 2-502 E-W. Por su parte, el sistema Robbins actuó como una infraestructura preventiva y estratégica que convierte los contrapozos no solo en una respuesta técnica inmediata, sino también en una inversión sostenible a mediano y largo plazo.

En conclusión, los resultados obtenidos prueban de forma indiscutible el valor estratégico de los sistemas Raise Boring, considerándolos como soluciones sustentables y costo-eficientes a mediano y largo plazo. La correlación positiva entre la mejora ambiental y el aumento de los volúmenes de producción reales otorga a esta investigación un alto potencial para otras unidades mineras que enfrenten condiciones geotérmicas profundas y desafiantes. Se recomienda adoptar un enfoque holístico que priorice la ventilación como eje central de la sostenibilidad operativa de las minas subterráneas.

V. AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Tecnológico Nacional de México, sede Instituto Tecnológico Superior Zacatecas Occidente, por los medios proporcionados para la realización de este estudio. Asimismo, se reconoce el apoyo de los docentes que facilitaron información técnica y operativa indispensable para el desarrollo de la investigación. Finalmente, se expresa un especial agradecimiento a la mina por brindar la oportunidad de llevar a cabo este proyecto en sus instalaciones, lo que permitió validar en campo la pertinencia y eficacia de las soluciones propuestas.

VI. REFERENCIAS

- Ávila Ávila, H. F. (2021). *Conflictos laborales y desempeño de los trabajadores de la Municipalidad Provincial de Jauja 2020* [Tesis de maestría, Universidad Continental]. Repositorio Institucional Continental. https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/10058/1/IV_FIN_109_TSP_Avila_Avila_2021.pdf
- Barton, N., & Shen, B. (2017). Risk of shear failure and extensional failure around over-stressed excavations in brittle rock. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9(2), 210–225. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.11.008>
- Coral Mucha, D. A. (2024). *Ampliación de la capacidad del circuito de ventilación para incrementar la cobertura de aire subterráneo en la Mina Contonga de Tierra Group International Ltd.* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio Institucional UNCP. <https://repositorio.uncp.edu.pe/items/b57a98e8-7d8d-4960-bad3-a3f119e8054b>
- Dueñas Chumbe, E. J. (2023). *Aplicación del método de perforación raise boring para la construcción de chimenea de ventilación en la U.P. Alpayana* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Universidad Nacional del Centro del Perú. https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/10459/T010_74023197_T.pdf
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., y Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (sexta ed.). McGraw-Hill Education.
- Hidalgo Blas, J. R. (2023). *Mejoramiento del sistema de ventilación con la construcción de una chimenea e implementación de ventiladores en la mina Chahuane – Arequipa* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/4735/1/T026_42101999_T.pdf
- Ibáñez Rodríguez, J. F., y Montoya Gómez, D. (2022). *Propuesta de mejora en la ventilación de la mina Carbones Torre Fuerte mediante un diseño de circuito de ventilación forzada* [Trabajo de especialización, Corporación Universitaria Minuto de Dios]. Corporación Universitaria Minuto de Dios. <https://repositorio.uniminuto.edu/server/api/core/bitstreams/3abf0664-3d0a-4c27-a17a-a4f64c31184c/content>
- Kanam, H., y Ahmed, O. (2021). A review on underground mine ventilation system. *Journal of Mines, Metals and Fuels*, 69(2), 62–70. <https://doi.org/10.18311/jmmf/2021/27334>
- Loayza Huari, A. (2021). *Optimización del sistema de ventilación a corto plazo en la unidad operativa Pallancata - Ayacucho* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. https://repositorio.unsaac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12918/6485/253T20210449_TC.pdf
- Merlé Hevia, N., Menéndez Rodríguez, J., Fernández-Oro, J. M., Álvarez de Prado, L., Loredó Pérez, J., & Bernardo-Sánchez, A. (2022). *Modelos matemáticos para el análisis de la dilución de gases tóxicos producidos en las voladuras de avance de galerías mineras a partir del sistema de ventilación*. En Simposio Internacional en Ventilación de Minas Iberoamericano (SIVM). Duro

Felguera; Sadim Ingeniería; Universidad de Oviedo; Universidad de León. <https://www.researchgate.net/publication/364936065>

Murphy, E., & Milne, W. (2014). *Underground mine ventilation: An overview*. *Mining Technology*, 123(3), 157–164.
<https://doi.org/10.1179/1743286314Y.0000000059>

Perrichon, M. (2019). Robbins Mexico small boring [Presentación PowerPoint]. LAMSTT. Obtenido de <https://afiliados.lamstt.org/images/docs/2019/trenchless-experts/miguel-perrichon-robbins-mexico-small-boring.pdf>

Pozo Bulnes, C. A., & Ari Utranco, J. A. (2023, septiembre). *Modelamiento y diagnóstico del circuito actual de ventilación en una mina subterránea y propuesta de mejora* [Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio PUCP. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/25925>

Sandvik Mining and Rock Solutions. (2021). *Safety and environmental considerations in deep mining ventilation systems* [White paper]. Sandvik AB. <https://www.rocktechnology.sandvik>

Secretaría del Trabajo y Previsión Social. (2021). *Condiciones de seguridad y salud en las minas* [NOM-023-STPS-2012]. Gobierno de México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/649834/Condiciones_de_Seguridad_y_Salud_en_las_Minas.pdf

Sotacuro Ramos, I. (2023). *Clasificación geomecánica de Barton para seleccionar sostenimiento de labores subterráneas en Unidad Minera Andaychagua de Volcan Compañía Minera S.A.A.* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio Institucional UNCP. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/9689>

Vargas Lloclla, V. (2020). *Optimización del sistema de ventilación en la Unidad Minera Yauliyacu* [Tesis de licenciatura, Universidad Continental]. Repositorio Institucional Continental. https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/9598/4/IV_FIN_110_TI_Vargas_Lloclla_2020.pdf

Tabla 1

Toneladas programadas en el mes de abril para silles del nivel 502

Producción x Sill Candelaria 2024				ABRIL		PLANEADAS				
Zona	Estructura	Labor	Metros	Tons	Ar gr/ton	Au gr/ton	Pb %	Zn %	VPT	Ton planeadas
Can 4	VETA 3.5	2-502 E-E	1	18	209	0.19	1.42	2.96	198.0	1080.00
Can 4	VETA 3.5	2-502 E-W	1	18	140	0.25	2.14	3.76	174.2	1080.00

Tabla 2

Toneladas programadas en el mes de mayo para silles del nivel 502

Producción x Sill Candelaria 2024				MAYO		PLANEADAS				
Zona	Estructura	Labor	Metros	Tons	Ag gr/ton	Au gr/ton	Pb %	Zn %	VPT	Ton planeadas
Can 4	VETA 3.5	2-502 E-E	1	31	97	0.05	0.99	2.10	105.3	1296.00
Can 4	VETA 3.5	2-502 E-W	1	31	191	0.69	1.59	2.88	196.9	1296.00

Tabla 3

reales mes de abril

Toneladas reales		ABRIL		Suma de Au	Suma de Pb	Suma de Zn	Suma de VPT	Dif ton
Tons		Suma de Ag						
2-502 E-E	1346	288	0.23	0.63	1.64	290.5	266	
2-502 E-W	1220	179	0.18	1.53	2.63	183.34	140	

Tabla 4

Toneladas reales mes de mayo

Toneladas reales		MAYO					
Tons		Suma de Ag	Suma de Au	Suma de Pb	Suma de Zn	Suma de VPT	Dif ton
2-502 E-E	1300	169	0.17	0.21	0.43	169.81	4
2-502 E-W	1300	292	0.26	1.37	1.64	295.27	4

No.	Rol	Descripción
1	Conceptualización	Ana Azucena Botello Navarro
2	Curación de datos	María Guadalupe Ceseñas Cordero
3	Análisis formal	Claudia Juliana Hernández Alaniz
4	Obtención de fondos	No aplica. Para esta investigación no se pidió apoyo financiero
5	Investigación	Ana Azucena Botello Navarro y Claudia Juliana Hernández Alaniz
6	Metodología	María Guadalupe Ceseñas Cordero
7	Administración del proyecto	Claudia Juliana Hernández Alaniz
8	Recursos	Ana Azucena Botello Navarro
9	Software	María Guadalupe Ceseñas Cordero
10	Supervisión	María Guadalupe Ceseñas Cordero
11	Validación	Claudia Juliana Hernández Alaniz
12	Visualización	Ana Azucena Botello Navarro y Claudia Juliana Hernández Alaniz
13	Redacción - borrador original	Claudia Juliana Hernández Alaniz y María Guadalupe Ceseñas Cordero
14	Redacción - revisión y edición	Ana Azucena Botello Navarro