



**Universidad
Católica de
Santa María**

**Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales
Escuela Profesional de Ingeniería de Minas**

**Propuesta técnica para la reestructuración del sistema de
ventilación en la zona NW-SE de la veta Mirtha en mina Tambomayo,
Compañía Minera Buenaventura S.A.A. Caylloma-Arequipa, 2025**

Tesis presentada por:

Cano Bellido, Renato Andre

ORCID: 0009-0006-1316-3513

para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas

Asesor:

Mg. Linares Flores Castro, Antonio Erick

ORCID: 0000-0003-0506-2297

Arequipa – Perú

2026

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA DE MINAS

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 13 de Agosto del 2026

Dictamen: 015332-C-EPIM-2026

Visto el borrador del expediente 015332, presentado por:

2016202781 - CANO BELLIDO RENATO ANDRE

Titulado:

**PROPUESTA TÉCNICA PARA LA REESTRUCTURACIÓN DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN EN LA
ZONA NW-SE DE LA VETA MIRTHA EN MINA TAMBOMAYO, COMPAÑÍA MINERA
BUENAVENTURA S.A.A. CAYLLOMA-AREQUIPA,2025**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Título Profesional/Título de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO DE MINAS

**40379481 - PAREDES SALAS OMAR WILLY
DICTAMINADOR**



**29635304 - MORALES VALDIVIA JAVIER ANTONIO
DICTAMINADOR**



**29640854 - MONTESINOS SOLORZANO CESAR GERARDO
DICTAMINADOR**



Propuesta técnica para la reestructuración del sistema de ventilación en la zona NW-SE de la veta Mirtha en mina Tambomayo, Compañía Minera Buenaventura S.A.A. Caylloma-Arequipa, 2025

INFORME DE ORIGINALIDAD

14%	14%	2%	4%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.uncp.edu.pe	6%
	Fuente de Internet	
2	repositorio.continental.edu.pe	3%
	Fuente de Internet	
3	hdl.handle.net	1%
	Fuente de Internet	
4	repositorio.uct.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
5	buleria.unileon.es	1%
	Fuente de Internet	
6	repositorio.undac.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
7	Submitted to Universidad Católica de Santa María	1%
	Trabajo del estudiante	

Excluir citas	Apagado	Excluir coincidencias	< 1%
Excluir bibliografía	Apagado		

Dedicatoria

A Dios, por brindarme la sabiduría, la fortaleza y las oportunidades necesarias para alcanzar esta meta.

Me gustaría expresar mi gratitud a mis padres por su amor incondicional, su generosidad y su apoyo inquebrantable. Para mí, su ejemplo de perseverancia y esfuerzo ha sido la fuente de inspiración más importante.

Me gustaría expresar mi agradecimiento a mi familia por haberme animado en los momentos difíciles y por haber confiado en mis capacidades.

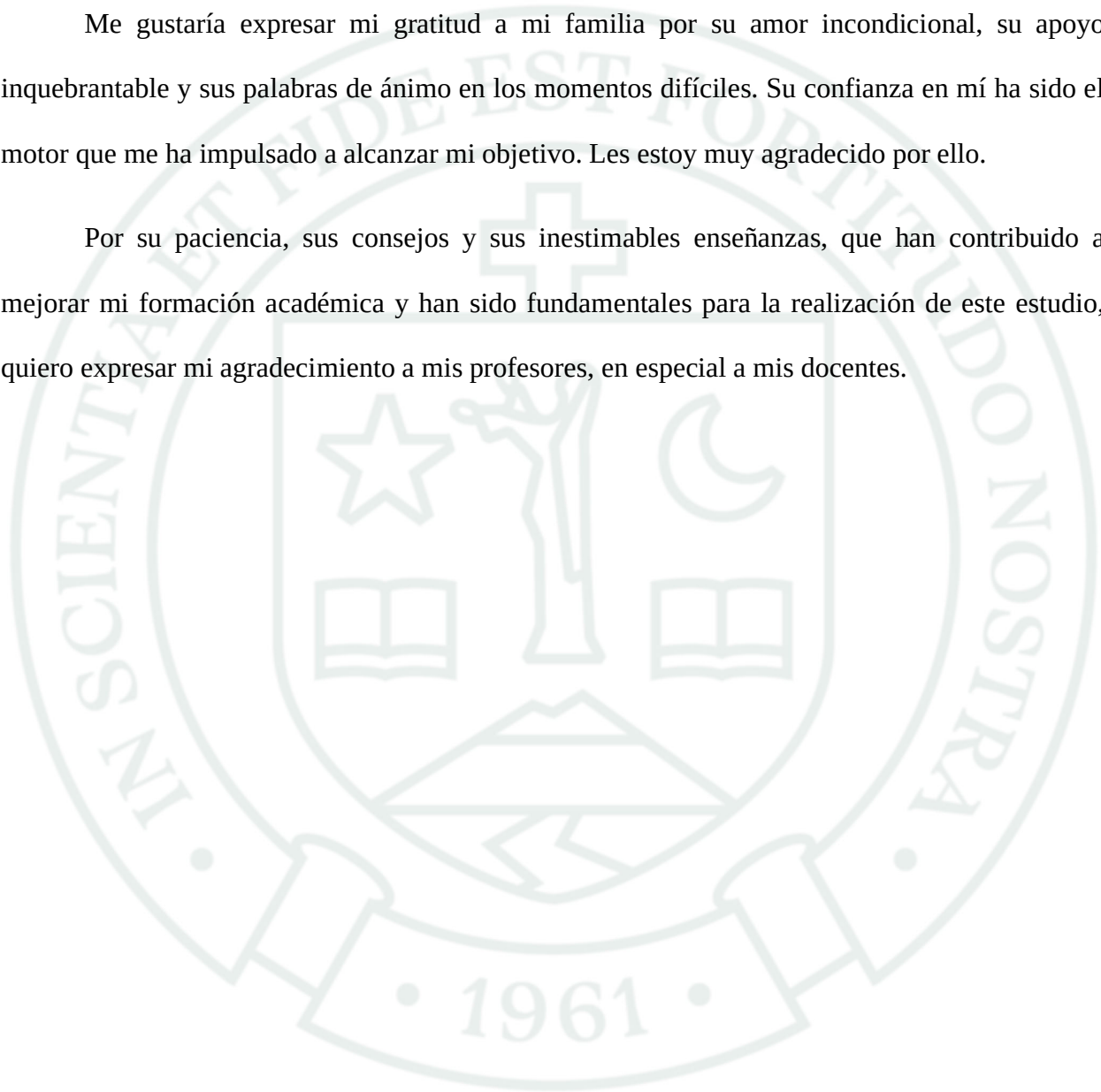


Agradecimientos

Quiero dar las gracias a Dios por ser mi guía y por darme la tenacidad necesaria para seguir adelante en todos los aspectos de mi vida, tanto en lo académico como en lo personal.

Me gustaría expresar mi gratitud a mi familia por su amor incondicional, su apoyo inquebrantable y sus palabras de ánimo en los momentos difíciles. Su confianza en mí ha sido el motor que me ha impulsado a alcanzar mi objetivo. Les estoy muy agradecido por ello.

Por su paciencia, sus consejos y sus inestimables enseñanzas, que han contribuido a mejorar mi formación académica y han sido fundamentales para la realización de este estudio, quiero expresar mi agradecimiento a mis profesores, en especial a mis docentes.



Epígrafe

"La educación no cambia el mundo, cambia a las personas que van a cambiar el mundo."

– Paulo– Paulo Freire



Resumen

En el año 2025, este artículo presenta una propuesta de mejora tecnológica del sistema de ventilación en el tramo noroeste-sureste de la veta Mirtha. Este tramo se encuentra en la mina Tambomayo, gestionada por la Compañía Minera Buenaventura S.A.A., y está situada en Caylloma, Arequipa. En el caso de las minas subterráneas, disponer de una ventilación adecuada es fundamental para garantizar la seguridad de los trabajadores, maximizar la eficiencia operativa y cumplir con la legislación medioambiental y de seguridad industrial.

El análisis comienza con un examen del sistema de ventilación actual, en el que se detectan ineficiencias en el flujo de aire, la acumulación de contaminantes y las pérdidas de eficiencia energética. Posteriormente, se lleva a cabo un estudio técnico en el que se tienen en cuenta las características de diseño de la ventilación subterránea, incluyendo el caudal de aire necesario, la distribución de los ventiladores y la resistencia del túnel.

A partir de este análisis, se propone un modelo para la reestructuración del sistema de ventilación, que incluye ajustes en la ubicación de los ventiladores, la incorporación de reguladores de caudal y mejoras en la red de conductos, con el objetivo de optimizar el suministro de aire fresco, reducir los riesgos laborales y aumentar la eficiencia energética de la mina.

Por último, se ofrece asesoramiento técnico y operativo para garantizar la implantación segura y satisfactoria del sistema propuesto, lo que se traduce en un entorno de trabajo más seguro y en el cumplimiento de los requisitos del sector minero.

Palabras clave: Ventilación subterránea, seguridad en el trabajo, eficiencia energética.

Abstract

This article presents a proposal for technological improvements to the ventilation system in the northwest-southeast section of the Mirtha vein by the year 2025. This section is located in the Tambomayo mine, operated by Compañía Minera Buenaventura S.A.A., in Caylloma, Arequipa. In the case of underground mines, adequate ventilation is essential to ensure worker safety, maximize operational efficiency, and comply with environmental and industrial safety regulations.

The analysis begins with an examination of the current ventilation system, during which inefficiencies in airflow, the accumulation of contaminants, and energy efficiency losses are identified. Subsequently, a technical study is conducted that takes into account the design characteristics of the underground ventilation system, including the required airflow rate, the distribution of fans, and the tunnel's resistance.

Based on this analysis, a model is proposed for restructuring the ventilation system, which includes adjustments to the location of the fans, the addition of airflow regulators, and improvements to the ductwork network, with the goal of optimizing the supply of fresh air, reducing occupational hazards, and increasing the mine's energy efficiency.

Finally, technical and operational guidance is provided to ensure the safe and successful implementation of the proposed system, resulting in a safer work environment and compliance with mining industry requirements.

Keywords: Underground ventilation, workplace safety, energy efficiency.

Índice

Dedicatoria	
Agradecimientos	
Epígrafe	
Resumen	
Abstract	
Introducción	1
CAPÍTULO I.....	3
1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	4
1.1. Planteamiento del Problema	4
1.2. Objetivos	6
1.2.1. General	6
1.2.2. Específicos	6
1.3. Preguntas de Investigación	7
1.3.1. General	7
1.3.2. Específicos	7
1.4. Líneas de Investigación a la que corresponde el Problema	7
1.5. Palabras Clave	8
1.6. Aporte del Desarrollo de la Tesis	8
CAPÍTULO II.....	9
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	10
2.1. Estado del arte.....	10
2.2. Antecedentes Investigación.....	15
2.2.1. Antecedentes internacionales	15
2.2.2. Antecedentes Nacionales.....	17
2.2.3. Antecedentes Locales	19
2.2.4. Fundamentos teóricos	20
2.2.4.1. Evaluación del sistema de ventilación	20
2.3. Hipótesis.....	30
2.3.1. Hipótesis General.....	30
2.3.2. Hipótesis Especificas.....	30
2.4. Variables.....	30
2.4.1. Variables Dependientes	31

2.4.2. Variables Independientes	31
CAPÍTULO III.....	32
3. MARCO METODOLÓGICO	33
3.1. Alcances y Limitaciones	33
3.1.1. Alcances.....	33
3.1.2. Limitaciones.....	33
3.2. Tipo y Diseño de la Investigación.....	34
3.2.1. Tipo de investigación	34
3.2.2. Diseño de investigación	34
3.3. Población y Muestra o Universo	35
3.3.1. Población	35
3.3.2. Muestra	35
3.4. Métodos, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.....	35
3.4.1. Método.....	35
3.4.2. Técnicas	36
3.4.3. Instrumentos	37
3.4.4. Validación y Calibración de Instrumentos	37
3.5. Plan de análisis estadístico de los datos	37
CAPÍTULO IV	39
4. RESULTADOS Y DISCUSIONES	40
4.1. Análisis e interpretación de resultados	40
4.1.1. Diagnóstico de las condiciones actuales del circuito de ventilación.....	40
4.1.2. Análisis de requerimientos termodinámicos y dilución de gases	43
4.1.3. Dimensionamiento y justificación de la nueva infraestructura (Chimenea Raise Boring).....	45
4.1.4. Simulación computacional de la red propuesta y selección de equipos.....	48
4.1.5. Contrastación de la efectividad: Sistema Actual vs. Sistema Propuesto.....	51
4.1.6. Evaluación de Costos Operativos e Impacto en la Productividad Continua	54
CONCLUSIONES	57
RECOMENDACIONES	58
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60
ANEXOS	63

Índice de Tablas

Tabla 1 Concentraciones máximas admisibles de gases y polvo en el interior de las minas	21
Tabla 2 Exposición máxima según el nivel de ruido en las actividades mineras.....	21
Tabla 3 Caudales de entrada y salida de aire	24
Tabla 4 Evaluación del Caudal de Aire Actual vs. Requerido en la Veta Mirtha (Nivel 4420)	41
Tabla 5 Cálculo Parametrizado de la Demanda de Aire Proyectada (Año 2025).....	43
Tabla 6 Parámetros Geomecánicos y Aerodinámicos de la Chimenea de Ventilación Propuesta	46
Tabla 7 Balance de Caudales y Caídas de Presión en Nodos Críticos (Simulación VentsimTM).....	49
Tabla 8 Matriz Comparativa de Indicadores de Ventilación (Actual vs. Propuesto)	51
Tabla 9 Análisis de Costo-Beneficio Estimado del Nuevo Circuito de Ventilación	54
Tabla 10 Flujo de Caja Económico Proyectado (En USD).....	77



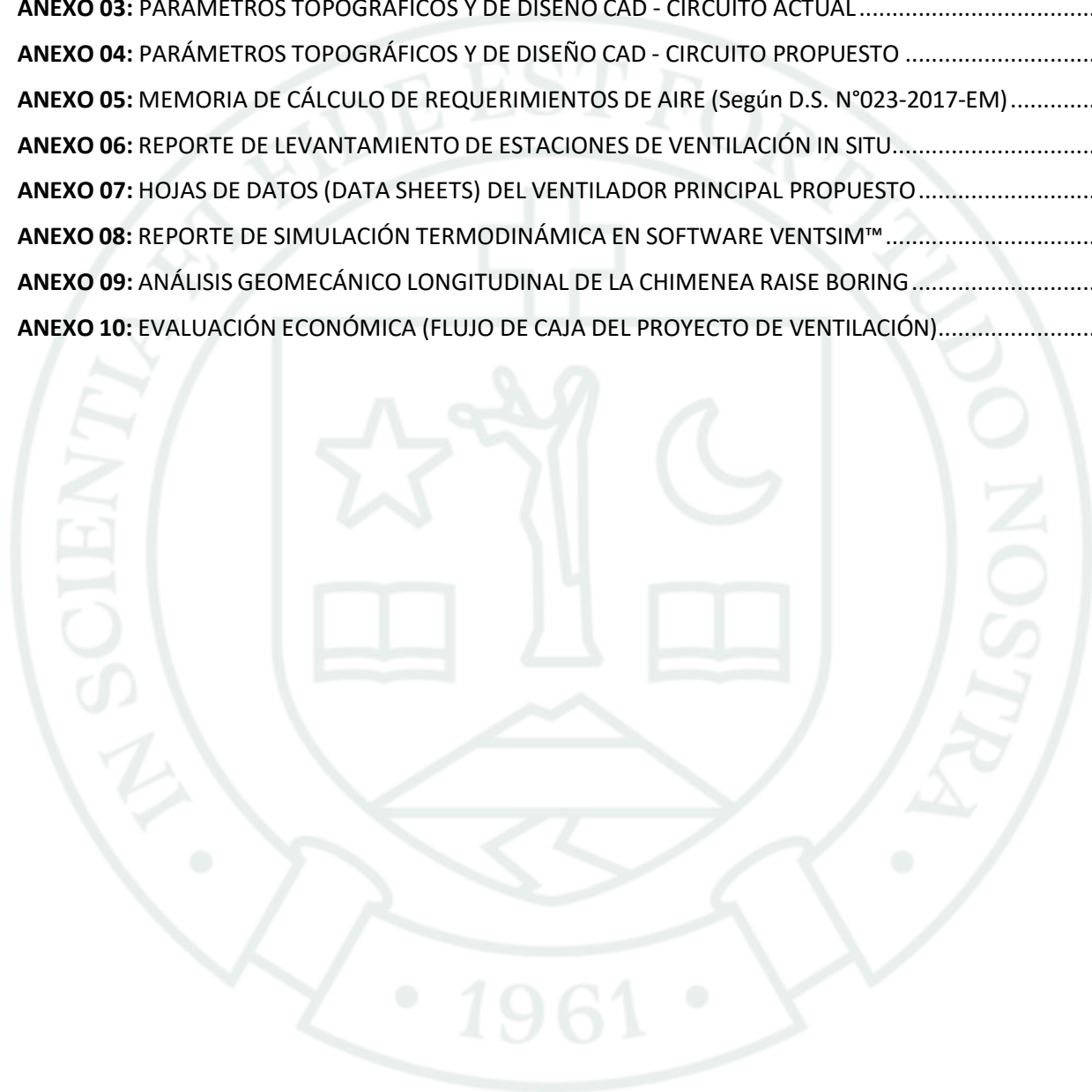
Índice de Figuras

Figura 1 Ejemplo de una curva característica de la mina de El Roble	26
Figura 2 Evolución de la silicosis en función de la duración de la exposición	27
Figura 3 Retención de polvo en la zona alveolar del pulmón	27
Figura 4 Efectos fisiológicos provocados por la falta de oxígeno	28
Figura 5 Perfil isométrico de la red de ventilación actual en VentsimTM y zonas de recirculación	42
Figura 6 Curvas de decaimiento de concentración de gases (CO y NO ₂) post-voladura según caudal	44
Figura 7 Sección esquemática transversal del circuito de ventilación propuesto.....	47
Figura 8 Curva característica combinada de la red minera y el ventilador principal axial seleccionado	50
Figura 9 Perfil comparativo de velocidad del aire y mitigación de estrés térmico en estocadas de avance	53
Figura 10 Proyección de la eficiencia energética del sistema (Potencia consumida vs. Caudal suministrado)	55



Índice de Anexos

ANEXO 01: ANÁLISIS DE COSTOS UNITARIOS (ACU) Y MATRIZ IPERC PARA LA PERFORACIÓN DE CHIMENEA RAISE BORING Ø 2.5 M	63
ANEXO 02: MATRIZ DE CONSISTENCIA LÓGICA DE LA INVESTIGACIÓN	67
ANEXO 03: PARÁMETROS TOPOGRÁFICOS Y DE DISEÑO CAD - CIRCUITO ACTUAL	68
ANEXO 04: PARÁMETROS TOPOGRÁFICOS Y DE DISEÑO CAD - CIRCUITO PROPUESTO	69
ANEXO 05: MEMORIA DE CÁLCULO DE REQUERIMIENTOS DE AIRE (Según D.S. N°023-2017-EM)	70
ANEXO 06: REPORTE DE LEVANTAMIENTO DE ESTACIONES DE VENTILACIÓN IN SITU.....	72
ANEXO 07: HOJAS DE DATOS (DATA SHEETS) DEL VENTILADOR PRINCIPAL PROPUESTO	73
ANEXO 08: REPORTE DE SIMULACIÓN TERMODINÁMICA EN SOFTWARE VENTSIM™	74
ANEXO 09: ANÁLISIS GEOMECÁNICO LONGITUDINAL DE LA CHIMENEA RAISE BORING	75
ANEXO 10: EVALUACIÓN ECONÓMICA (FLUJO DE CAJA DEL PROYECTO DE VENTILACIÓN).....	76



Introducción

Los sistemas de ventilación son uno de los principales métodos para minimizar la contaminación por gases en entornos cerrados y regulados, especialmente en entornos industriales, laboratorios y zonas de trabajo en las que las actividades generan emisiones de gases peligrosos. Estos sistemas tienen por objeto garantizar la calidad del aire, proteger la salud de las personas y evitar la acumulación de contaminantes que puedan afectar tanto a los trabajadores como al medio ambiente.

La contaminación por gases en espacios cerrados puede deberse a diversas causas, como los procesos de combustión, las emisiones de equipos industriales y el uso de productos químicos, entre otras. Las consecuencias de la exposición a estos gases pueden ser graves, incluyendo problemas respiratorios, intoxicaciones y, en casos extremos, daños permanentes en órganos vitales. Por este motivo, los sistemas de ventilación no solo cumplen una función estética o de confort, sino que también desempeñan un papel esencial para la salud y la seguridad.

Existen varios tipos de sistemas de ventilación, cada uno de ellos diseñado para satisfacer las distintas necesidades y características de los espacios. Pueden ser sistemas naturales, que aprovechan la circulación del aire impulsada por la presión y la temperatura externas, o sistemas mecánicos, que utilizan ventiladores, conductos y extractores para controlar la circulación del aire y eliminar los contaminantes.

El diseño de un sistema de ventilación eficaz es fundamental para minimizar la concentración de contaminantes atmosféricos y mejorar las condiciones de trabajo. Además, un diseño eficaz de estos sistemas contribuye a optimizar el consumo energético y a reducir los

costes operativos, lo que redunda en la sostenibilidad. Sin embargo, el diseño de un sistema de ventilación no debe basarse únicamente en el volumen de aire que hay que extraer, sino también en aspectos como la distribución de los contaminantes, el tamaño y el tipo de espacio, así como en la normativa local en materia de salud y seguridad.

Esta tesis está organizada en tres capítulos; el primero está referido al planteamiento de la investigación, el segundo fundamento teórico, el tercero marco metodológico y el cuarto capítulo resultado y discusiones, conclusiones y recomendaciones. Esta investigación se desarrollará con datos bibliográficos de la Mina Tambomayo, compañía minera buenaventura S.A.A. Caylloma-Arequipa.





CAPÍTULO I

1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento del Problema

La falta de un sistema de ventilación eficaz en las empresas mineras de todo el mundo constituye un grave problema que afecta a la salud y la seguridad de los trabajadores. En la minería subterránea, la ventilación es fundamental para garantizar un ambiente seguro y respirable, ya que la acumulación de gases y partículas peligrosas puede tener consecuencias letales. Una ventilación deficiente puede provocar un aumento de las infecciones respiratorias y de los accidentes laborales, lo que pone en riesgo no solo a los trabajadores, sino también la productividad de las operaciones mineras. (Meneses, 2022)

A nivel internacional, las normas de seguridad minera han evolucionado para hacer hincapié en la necesidad de la ventilación. Sin embargo, en muchas regiones especialmente en los países en desarrollo la implantación de sistemas de ventilación adecuados sigue siendo un reto. Las condiciones geográficas y climáticas, como la altitud y la temperatura, pueden influir en el diseño y el rendimiento de estos sistemas. (Seguridad Minera , 2027)

En Perú, este problema es especialmente grave debido al enorme número de actividades mineras subterráneas. El Reglamento sobre Seguridad y Salud en el Trabajo en la Minería establece normas estrictas en materia de ventilación, señalando que el comportamiento del aire varía considerablemente en función de la altitud y otras condiciones ambientales. (Seguridad Minera , 2017)

Sin embargo, muchas minas siguen teniendo dificultades para implantar sistemas de ventilación adecuados. La falta de un sistema adecuado puede provocar la acumulación de contaminantes, lo que perjudica la salud y el rendimiento de los trabajadores.

La ventilación de las minas es uno de los factores fundamentales para mantener la seguridad y el confort de los trabajadores que laboran sobre todo al interior de minas del tipo subterráneo, aspectos que están bastante detallados en la legislación laboral de nuestro país específicamente en el decreto supremo 024-2016-EM y su actualización el D.S. 023-2017-EM. En la que se resalta aspectos como ventilación, temperatura, velocidad máximas y mínimas del flujo del aire para lugares de tránsito de personas y presencia de motores a combustión, además también en este reglamento se especifica claramente los límites máximos y mínimos permisibles para la presencia de diferentes tipos de gases entre ellos el oxígeno, todo esto debe ser ampliamente conocido y manejado por los actuales profesionales mineros.

La mina Tambomayo de CIA. Buenaventura. es una mina en crecimiento, tanto en producción, infraestructura, personal y equipos. Los servicios deben estar atentos a estos cambios y prepararse en consecuencia, como en el caso de la ventilación, cuyo objetivo es mantener y garantizar unas condiciones mínimas de trabajo, así como cumplir con las restricciones legales vigentes. Por lo tanto, es fundamental replantearse el sistema de ventilación actual, comenzando por un análisis del sistema que utilizamos actualmente y la propuesta de una alternativa que permita hacer frente a la ampliación de la mina. Es necesario construir pozos de ventilación con diámetros mayores que los construidos anteriormente para dar cabida a este aumento. Estos pozos deben situarse en función de la profundidad de los yacimientos minerales. Queremos construir pozos principales con diámetros superiores a 2,1 metros, y instalaremos ventiladores secundarios en ellos para aumentar la circulación dentro de la mina y renovar el aire viciado. Además, renovaremos algunos túneles y galerías transversales para facilitar la entrada y salida de aire. El objetivo de esta investigación es elaborar un diseño de ventilación adecuado para las operaciones de profundización de minas, determinando las necesidades mínimas de ventilación

imprescindibles para la minería subterránea. Se abordarán varios de los problemas actuales con la ayuda de las conclusiones de la evaluación, lo que permitirá que las actividades mineras se lleven a cabo de forma segura, eficaz y eficiente, de conformidad con la normativa vigente.

La Cia. Buenaventura, que tiene a su cargo la Minera Tambomayo, donde se pretende ejecutar la investigación, se busca analizar todas las variables que afectan la atmósfera subterránea y determinar los parámetros que intervienen en la contaminación del aire, disminuyendo la contaminación de gases.

Se observa que el yacimiento, por ser de reciente intervención en el mercado de explotación minera, va creciendo la profundización de sus galerías, chimeneas y trabajos de explotación por ello los sistemas de ventilación se van adecuando al avance.

1.2. Objetivos

1.2.1. General

Elaborar una propuesta técnica para la reestructuración del sistema de ventilación en la zona NW-SE de la veta Mirtha en mina Tambomayo, compañía minera Buenaventura S.A.A. Caylloma-Arequipa, 2025.

1.2.2. Específicos

- Analizar el estado actual del sistema de ventilación en la zona NW–SE de la veta Mirtha, identificando las deficiencias operativas y los puntos clave de la mina de Tambomayo en los que se registran altas concentraciones de gases contaminantes.
- Realizar el cálculo de los caudales requeridos de flujo, diámetros de redimensionamiento de las chimeneas, capacidades de nuevos ventiladores y

diferencias en el rendimiento del sistema para mejorar el flujo de aire, en la mina Tambomayo.

- Desarrollar el diseño de un nuevo circuito del sistema de ventilación para la evacuación de humo polvo y gases en las labores de galería, en la mina Tambomayo.

1.3. Preguntas de Investigación

1.3.1. General

¿La propuesta de un diseño de una chimenea y equipos de ventilación contribuirán a hacer más eficiente la ventilación en la veta Mirtha de mina Tambomayo, disminuyendo la emisión de gases?

1.3.2. Específicos

¿Dado sus años en operación el actual sistema de ventilación en la veta Mirtha de mina Tambomayo será lo suficientemente eficiente?

¿Cuál es el diseño más óptimo para implementar una chimenea en beta Mirtha de mina Tambomayo?

¿Cuál es la forma más óptima de implementar nuevos equipos de ventilación acoplándolos al sistema ya existente?

1.4. Líneas de Investigación a la que corresponde el Problema

- Influencia de la Minería en el ámbito político y económico del Perú.
- Análisis costo-beneficio de la Minería en el Perú.
- El Derecho Ambiental y Compromiso del cuidado del mismo.

- Efectividad del trabajador en las labores subterráneas, después de la instalación del diseño del sistema de ventilación en los ambientes de trabajo de la zona NW-SE de la veta Mirtha en Mina Tambomayo.

1.5. Palabras Clave

Ventilación, optimización, contaminación, gases.

1.6. Aporte del Desarrollo de la Tesis

La contribución fundamental de esta tesis sobre la ventilación en la mina de Tambomayo radica en proponer un diseño para un pozo de ventilación y equipos de ventilación que contribuyan con el fin de proporcionar a los mineros un entorno de trabajo que sea a la vez seguro y saludable. Los principales objetivos de una ventilación adecuada son suministrar oxígeno para respirar, diluir y eliminar los gases tóxicos presentes en la mina, reducir las concentraciones de polvo en suspensión y rebajar las altas temperaturas en las galerías subterráneas. Esto no solo contribuye a mejorar las condiciones de trabajo, sino que también evita enfermedades respiratorias y relacionadas con el calor, garantizando así el bienestar de los trabajadores y la eficacia de las operaciones mineras.



CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Estado del arte

Varios estudios recientes han abordado las cuestiones relacionadas con los sistemas de ventilación en la minería subterránea, centrándose en las estimaciones del caudal, la selección de equipos, el diseño de pozos, la modelización por ordenador y la influencia en la salud laboral, aspectos todos ellos estrechamente relacionados con este tema.

Según Vásquez J. (2021) Esta tesis analiza el sistema de ventilación de una mina subterránea en Cajabamba, calculando los caudales de aire necesarios para los trabajadores, la producción y el consumo de explosivos, y concluye que no es necesaria la ventilación artificial, sino que se debe mejorar la ventilación natural mediante aberturas estratégicas. Esta investigación subraya la necesidad de incorporar alternativas pasivas como parte del análisis de optimización, especialmente en aquellos lugares donde la topografía lo permita.

Almerco L. (2022) establece cómo contribuye la inspección del sistema de ventilación a reducir la falta de aire en la mina de Antapite, y recomienda un rediseño del sistema que incluya la instalación de ventiladores auxiliares y mejoras en la extracción del aire viciado. Esta idea pone de relieve la necesidad de introducir cambios estructurales y de instalar equipos adicionales cuando el sistema actual no cumple los requisitos operativos.

Ramirez L. (2022) en él se establece que debe diseñarse un sistema de ventilación adaptado a las necesidades de la mina subterránea de Huinac, calculando los caudales de aire necesarios para los trabajadores, el consumo de leña, la temperatura, el uso de explosivos y las fugas de aire, y recomendando la instalación de un ventilador para subsanar el déficit detectado. Esta técnica

pone de relieve el concepto tecnológico que vincula el número y el tipo de fuentes de contaminación con la necesidad de aumentar el caudal de aire.

Zúñiga R. (2024) indica que la instalación del ventilador de tiro inducido en el túnel Raise Boring 424 dio como resultado una temperatura de 22,6 °C y un caudal de aire de 141 289 CFM, lo que sugiere una mejora considerable en el sistema de ventilación en comparación con los datos anteriores a la instalación. Esta investigación empírica corrobora la utilidad de instalar ventiladores en chimeneas construidas estratégicamente.

Vives et al. (2022) mediante métodos de dinámica de fluidos computacional (CFD), este estudio se centra en la mejora del sistema de ventilación auxiliar en una mina subterránea. La investigación analiza cómo la modelización computacional puede mejorar la ventilación secundaria mediante la evaluación de la influencia de la distancia al frente de trabajo, la temperatura, la posición de los conductos y la velocidad del aire. Los resultados justifican el uso de la CFD para identificar mejoras, predecir el rendimiento futuro y facilitar la selección del diseño ideal para el sistema de ventilación auxiliar. Este trabajo es relevante para la investigación actual, ya que destaca cómo las herramientas de simulación, como Ventsim™, permiten validar las modificaciones propuestas antes de su implementación.

Hevia N. (2023) mediante enfoques analíticos y numéricos, esta investigación evalúa la emisión, la concentración, la propagación y la dilución de gases peligrosos (CO, NO, NO₂) generados por las voladuras subterráneas, basándose en tres tipos de ventilación (por soplante, por extracción y mixta) y en diferentes velocidades del flujo de aire. El estudio establece los tiempos de reentrada seguros, identificando el monóxido de carbono como el gas más relevante y demostrando la mayor eficacia del sistema de ventilación mixta a la hora de reducir dichos tiempos, lo que permite optimizar los ciclos de avance y, posiblemente, reducir los costes operativos. Esta

información proporciona una base científica para evaluar sistemas de ventilación alternativos, teniendo en cuenta el tipo y el comportamiento de los gases generados.

Pérez C. et al. (2023) evalúa el sistema de ventilación de la zona de El Inca mediante un análisis bibliográfico, la cartografía de secciones transversales y el seguimiento de variables clave. A partir de los datos obtenidos, se calculan el caudal de aire necesario, la temperatura efectiva y la humedad media, y se comparan con las normas nacionales. La modelización 3D en Ventsim™ respalda el estudio, proporcionando una evaluación completa del sistema de ventilación que contribuye a un entorno de trabajo seguro y saludable, y ofrece sugerencias para futuras mejoras y la optimización del control de contaminantes y de las condiciones de temperatura. Este estudio respalda el uso de herramientas de simulación como parte del proceso de diseño técnico del sistema de ventilación de Tambomayo.

Cieza y Rabines (2023) se recomendó mejorar la ventilación mediante modelos aplicados y descriptivos. Tras detectar un déficit de aire, se simuló una red de ventilación con Ventsim, lo que permitió determinar una demanda de aire de 14 670,42 cfm. La instalación de un ventilador axial Ktperú AVM-540-350-10, con una capacidad de 10 000 CFM, aumentó el caudal de aire a 15 158,4 cfm. Se decidió que este ventilador maximizaba la ventilación en la mina, mejorando las condiciones de trabajo y el bienestar del personal. La investigación demostró cómo un análisis minucioso puede conducir a soluciones específicas que contribuyen directamente al bienestar del personal.

Cruz y Cotrina (2022), se creó un sistema de ventilación mejorado para potenciar el flujo de aire y eliminar los gases peligrosos. Mediante una técnica cuantitativa y un diseño experimental, las simulaciones indicaron una entrada de aire limpio de 6,8 m³/s y una salida de aire contaminado de 5,2 m³/s. Se demostró que el dispositivo propuesto, que cuenta con un ventilador auxiliar de

408 m³/min, aumenta considerablemente la circulación del aire y la dilución de gases peligrosos. Este concepto ilustra cómo las modificaciones estructurales, junto con la instalación de equipos adecuados, mejoran considerablemente la calidad del aire subterráneo.

Zavala (2022), se analizó el impacto del sistema de ventilación en la corrección del déficit de flujo de aire. Mediante una metodología aplicada, descriptiva y explicativa, se determinó que el caudal ideal debería ser de 172 111 CFM, mientras que la eficiencia actual era del 39 % con un caudal de aire de 66 934 CFM. Se estimó que la mejora del sistema mediante la incorporación de ventiladores auxiliares reduciría el tiempo necesario para evacuar el aire contaminado de 2,5 a 1,67 horas, lo que maximizaría la eliminación de gases y mejoraría las condiciones de trabajo. Este caso es especialmente relevante para la presente investigación, ya que también pretende evaluar las dimensiones y los fundamentos técnicos de una chimenea para mejorar el sistema de ventilación.

Espinoza J. (2023) se centra en el cálculo de las especificaciones de diseño de un pozo de ventilación (sección transversal de 2 x 2 m, 280 m de longitud y una pendiente de 80° en roca de tipo II) para aumentar la ventilación en la rampa 440. Mediante un método aplicado, descriptivo, explicativo y correlacional, la investigación recurre a ensayos, observaciones y mediciones convencionales, así como a herramientas informáticas para el diseño y el análisis de costes y la simulación del flujo de aire. La construcción, que utilizará la plataforma Alimak STH-5E, con un coste de 495,29 dólares por metro, permitirá satisfacer los requisitos de ventilación de la rampa, aumentando la tasa de ventilación del 64,60 % al 105,35 %, cumpliendo así de conformidad con la legislación en materia de seguridad y salud en el trabajo.

Las investigaciones anteriores han demostrado que la optimización de la ventilación en minería subterránea requiere un diagnóstico preciso del sistema actual, el cálculo adecuado de los

caudales de aire según las fuentes contaminantes (personal, equipos, explosivos) y el diseño técnico de componentes como chimeneas y ventiladores.

Según Vásquez J. (2021) Esta tesis analiza el sistema de ventilación de una mina subterránea en Cajabamba, calculando los caudales de aire necesarios para las personas, producción y consumo de explosivos, y concluye que no se necesita ventilación artificial, sino mejorar la ventilación natural mediante aperturas estratégicas. Por consiguiente. Almerco L. (2022) determina cómo contribuye la evaluación del sistema de ventilación a mejorar la falta de aire en la mina de Antapite, proponiendo un rediseño del sistema que incluye la instalación de ventiladoras auxiliares y mejora en la evacuación del aire viciado.

Ramirez L. (2022) afirma que un sistema de ventilación adaptado a las condiciones de la minera subterránea Huinac, calculando los caudales de aire requeridos por trabajadores, consumo de madera, temperatura, uso de explosivos y fugas, y recomendando la implementación de un ventilador para cubrir el déficit identificado. Posteriormente Zúñiga R. (2024) el informe concluye que la instalación del extractor en la chimenea del Raise Boring 424 dio lugar a una temperatura de 22,6 °C y a un caudal de aire de 141 289 CFM, lo que supone una mejora considerable del sistema de ventilación en comparación con los datos anteriores a la instalación.

Vásquez (2021) y Almerco (2022) aportan metodologías para evaluar el sistema existente y proponer mejoras basadas en ventilación natural y rediseño estructural; Ramírez (2022) y Zúñiga (2024) destacan la necesidad de incorporar ventiladores en chimeneas para cubrir déficits de caudal y mejorar temperatura; mientras que Espinoza (2023) plantea parámetros específicos para el dimensionamiento de chimeneas, aspecto central en el presente estudio. Por otro lado, investigaciones como las de Vives et al. (2022) y Pérez et al. (2023) resaltan el uso de simulación computacional (CFD y Ventsim™) para predecir comportamientos y validar propuestas de mejora;

Hevia (2023) muestra cómo el tipo de sistema influye en los tiempos de reentrada; y Zavala (2022), Cieza y Rabines (2023), y Cruz y Cotrina (2022) evidencian el impacto directo de un diseño optimizado en la eficiencia operativa, la reducción de gases contaminantes y la mejora del bienestar del personal. Estos aportes respaldan y enriquecen el enfoque de la presente investigación, que busca diseñar y justificar técnicamente una chimenea de ventilación con diámetro mayor a 2.1 m en la zona NW–SE de la veta Mirtha, a fin de reducir las emisiones de metano y garantizar unas condiciones seguras en la mina de Tambomayo.

2.2. Antecedentes Investigación

2.2.1. Antecedentes internacionales

Vives et al. (2022) llevaron a cabo una investigación titulada «Estudio de dinámica de fluidos computacional (CFD) para optimizar el sistema de ventilación auxiliar en una mina subterránea», con el objetivo de optimizar la ventilación secundaria en condiciones de minería subterránea mediante modelos computacionales. La técnica utilizada está basado en ideas científicas con un enfoque explicativo. Los resultados pusieron de manifiesto un empeoramiento constante de las condiciones a medida que el túnel se alejaba del frente de trabajo; además, su ubicación dentro de la sección transversal se veía afectada por parámetros como la temperatura, la zona concreta del frente de trabajo y la velocidad del aire. Se concluyó que el modelo generado es una herramienta valiosa para identificar mejoras en el sistema de ventilación auxiliar y analizar escenarios futuros, lo que facilita la selección adecuada del diseño del sistema de ventilación secundaria.

Hevia N. (2023) el autor del estudio titulado «Emisiones de gases tóxicos en voladuras subterráneas: concentración, propagación y dilución en función del tipo de ventilación mediante métodos analíticos y numéricos, y análisis de optimización de los ciclos de avance» incluyeron la

siguiente información en sus conclusiones: Con caudales de aire fresco de 30 y 40 m³/s, se analizaron tres tipos diferentes de ventilación —por soplado, por extracción y mixta— con el fin de determinar los tiempos de reentrada seguros tras una voladura en un túnel de 200 metros de longitud y con una sección transversal de 68 metros cuadrados. El túnel se excavó mediante el método de avance y rotura, que implicaba perforación y voladura. Se propone utilizar 118 kg de explosivos en emulsión en una detonación que tiene lugar durante la fase de avance. La longitud del túnel afectada por los gases de la explosión, así como las concentraciones iniciales de monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y dióxido de nitrógeno, se calculan en función de la cantidad de explosivos. Se analizaron las variaciones en las concentraciones de gases a lo largo de secciones transversales situadas a intervalos de 25 metros, lo que puso de manifiesto la concentración disminuye a medida que los gases se acercan a la salida del túnel. Según los resultados de la simulación, el monóxido de carbono es el gas más peligroso, ya que se necesita un tiempo de ventilación más prolongado para que su concentración descienda por debajo del nivel considerado seguro para una exposición prolongada. En el modo de ventilación con ventilador, el tiempo de reentrada segura supera los 480 segundos. Sin embargo, cuando se emplea un sistema de ventilación mixta tras la voladura, el tiempo de reentrada segura se reduce a 155 segundos, lo que se traduce en una reducción de los gastos de explotación.

Perez C. et al. (2023) en su trabajo «Análisis de la ventilación de minas aplicada en GRUMINTOR S.A.». se llevó a cabo una investigación bibliográfica detallada sobre los principales aspectos relacionados con los sistemas de ventilación en la minería subterránea. Además, se realizaron levantamientos topográficos de las secciones transversales de las galerías mineras que conforman la región de El Inca y se instalaron estaciones de monitorización para evaluar variables fundamentales, como la velocidad del aire, las concentraciones de gases, las

temperaturas de bulbo seco y de bulbo húmedo, y la humedad relativa. A partir de la información obtenida, se determinó el caudal de aire necesario para el Nivel 2. Además, se calcularon la temperatura efectiva y la humedad media en la región de El Inca. Se evaluó el rendimiento del sistema de ventilación comparando las irregularidades detectadas en relación con la normativa nacional de seguridad. Esto permitió evaluar el rendimiento general. A partir de los datos topográficos recopilados, se elaboró un modelo tridimensional de la región utilizando el programa Ventsim™. El objetivo era conocer mejor la dinámica de los flujos de aire en la zona objeto del estudio. En conclusión, los resultados de esta investigación proporcionan un análisis crítico y exhaustivo del sistema de ventilación de la zona de El Inca. Esta evaluación contribuye al mantenimiento de un entorno de trabajo seguro y saludable para quienes trabajan en la industria minera. Además, la organización puede utilizar las sugerencias formuladas para desarrollar y optimizar el sistema de ventilación en el futuro. Esto permitiría una gestión más eficaz de las condiciones de temperatura y humedad en el lugar de trabajo, así como una gestión más eficaz de los contaminantes del aire.

2.2.2. Antecedentes Nacionales

Cieza y Rabines (2023) La investigación que llevaron a cabo se titulaba «Diseño de un sistema de ventilación para optimizar la calidad del aire en la mina Sirius Alfa–Pátapo», y fue en este estudio donde defendieron el uso de modelos para mejorar la ventilación. Se trató de un estudio aplicado con un diseño experimental descriptivo. Tras analizar los datos, se determinó que la zona de producción presentaba un suministro de aire insuficiente. Esto llevó a la modelización de un sistema de ventilación mediante Ventsim, lo que permitió determinar una necesidad de 14 670,42 pies cúbicos por minuto (cfm). Para subsanar este déficit, se instaló un ventilador axial Ktperú AVM-540-350-10 con una capacidad de 10 000 CFM, lo que elevó el

caudal de aire a 15 158,4 cfm. Finalmente, se determinó que este ventilador en concreto era la opción más adecuada para maximizar la ventilación en la mina, lo que, en última instancia, condujo a una mejora de las condiciones de trabajo y de la salud y el bienestar general de los empleados.

Cruz y Cotrina (2022) , en su investigación titulada «Diseño de un sistema de ventilación para mejorar la circulación del aire y la dilución de gases en el nivel 4049 de una unidad minera en el distrito de Buldibuyo, 2020», desarrollaron un circuito de ventilación optimizado con el objetivo de aumentar el caudal de aire y reducir la concentración de gases tóxicos en la mina. El estudio utilizó un enfoque cuantitativo, práctico y explicativo basado en un diseño poco habitual. Los resultados de las pruebas simuladas demostraron que el sistema previsto permite una entrada de aire limpio a un caudal de 6,8 m³/s (14 408,52 CFM) y una salida de aire contaminado a un caudal aproximadamente 5,2 m³/s (11 018,28 CFM). Se descubrió que el modelo propuesto mejora considerablemente la circulación del aire y reduce los gases peligrosos al incluir un ventilador auxiliar con un caudal de aire de 408 m³/min (15 000 CFM) que funciona en un sistema de tiro forzado.

Zavala (2022) , En su estudio titulado «Evaluación del sistema de ventilación para corregir el déficit de aire en la mina de Antapite de la Empresa Sierra Antapite S.A.C., 2022», evaluó el impacto del sistema de ventilación en la corrección del déficit de flujo de aire dentro de la mina. La técnica empleada se basó en el método científico, con un enfoque aplicado, descriptivo y explicativo, utilizando un diseño descriptivo-comparativo. Tras estudiar los circuitos de ventilación y los ventiladores actuales, se calculó que el caudal de aire ideal debería alcanzar los 172 111 CFM, mientras que las emisiones de gas ascendían a 66 934 CFM, lo que muestra una eficiencia del sistema, que se sitúa en tan solo el 39 %. Además, se ha revelado que, en las

circunstancias actuales, se tarda 2 horas y 30 minutos en evacuar el aire contaminado, pero con el cambio del sistema, este tiempo se reduciría a 1 hora y 40 minutos, lo que supone una disminución del 33,33 %. En conclusión, la instalación de ventiladores adicionales potenciará el flujo de aire y optimizará la extracción de gases, mejorando así el rendimiento y las condiciones de trabajo del personal.

2.2.3. Antecedentes Locales

Espinoza J. (2023) en su investigación, “Diseño y construcción de la chimenea – 017, para mejorar la ventilación en la rampa 440 de la Compañía MACDESA – Arequipa”. Con el fin de aumentar la ventilación en las profundidades de la rampa 440 de MACDESA, en Arequipa, el objetivo principal de esta tesis es identificar los parámetros de diseño de la chimenea 017. Esto se logrará mediante el análisis de dichos parámetros. El estudio es de carácter descriptivo y de naturaleza aplicada, con un componente normativo y cuantitativo en función del tipo de datos que se recopilen. El estudio es descriptivo, explicativo y correlacional, y recurre a procedimientos convencionales de ensayo, observación y medición con el fin de determinar las características del sistema de ventilación ubicado en la rampa 440. El diseño, el análisis de costes y el estudio de la circulación del flujo de aire de la rampa 440 se llevaron a cabo mediante herramientas informáticas destinadas al procesamiento de datos. A continuación se detallan las especificaciones de diseño de la chimenea 017: una longitud de 280 metros, una inclinación de 80 grados, unas dimensiones de la sección transversal de 2 metros por 2 metros y roca de tipo II. Por consiguiente, a la luz de estas características, la técnica de construcción más adecuada es la plataforma eléctrica Alimak STH-5E, cuyo precio de compra es de 495,29 dólares por metro. La rampa 440, donde actualmente solo se alcanza el 64,60 % del caudal de aire necesario (88 340,96 CFM), experimentará una mejora en la ventilación como resultado de esta intervención. Tan

pronto como finalice la construcción de la chimenea 017, la demanda de aire se cubrirá al 105,35 %, lo que se ajustará a la normativa que regula la seguridad y la salud en el trabajo en el sector minero.

2.2.4. Fundamentos teóricos

2.2.4.1. Evaluación del sistema de ventilación

Castillo (2017) sostiene que los indicadores utilizados para evaluar el proceso de ventilación incluyen los caudales o la capacidad de ventilación de una mina, la temperatura, las mediciones de los gases presentes en la mina, las necesidades de flujo de aire, las pérdidas de presión en el sistema de ventilación y el coste del consumo eléctrico

El Decreto Presidencial n.º 023-2017 (2017) y el Decreto Presidencial n.º 024-2016-EM (2016), en cuyo artículo 246 se establece que: el operador de cualquier explotación minera debe garantizar el suministro de aire fresco y limpio en las zonas de trabajo y, de acuerdo con las necesidades de los trabajadores en sus diversas actividades, debe proporcionar también el equipo necesario para eliminar gases, humos y polvo de las zonas de trabajo mineras, así como mantener unas condiciones de temperatura confortables y adecuadas para los trabajadores.

El documento DS. 023-2017-EM (2017) establece los límites máximos permitidos. Este documento fija los valores máximos permitidos para el dióxido de carbono, el monóxido de carbono, el dióxido de nitrógeno, el nitrógeno, el porcentaje mínimo de oxígeno y el polvo inhalable y respirable. Estas normas están diseñadas para reducir los riesgos para la seguridad y la salud de los trabajadores en la explotación minera.

La lista de los niveles máximos permitidos para gases y polvo se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 1

Concentraciones máximas admisibles de gases y polvo en el interior de las minas

Agentes químicos (en el aire)	Límite TWA	Límite STEL
Dióxido de carbono	50000 ppm	30000 ppm
Dióxido de nitrógeno	3 ppm	5 ppm
Monóxido de carbono (CO)	25 ppm	
Monóxido de nitrógeno	25 ppm	
Oxígeno (O ₂)	19.5 %	
Polvo inhalable (1)	10 mg/m ³	
Polvo respirable	3 mg/m ³	

Nota: Se trata de los agentes químicos presentes en el aire.

Fuente: Recopilado por el autor a partir de datos operativos de Cía. Minera Buenaventura, 2025.

La norma DS. 023-2017-EM (2017), en su anexo 12, establece los límites máximos de exposición al ruido para los trabajadores en función de los niveles de ruido asociados a sus distintas profesiones; el ruido se mide en decibelios.

Tabla 2

Exposición máxima según el nivel de ruido en las actividades mineras

Escala de ponderación “A”	Tiempo de Exposición Máximo en una jornada laboral
82 decibeles	16 horas/ día
83 decibeles	12 horas/ día
85 decibeles	8 horas/ día
88 decibeles	4 horas/ día
91 decibeles	1 ½ horas/ día
94 decibeles	1 hora/ día
97 decibeles	½ hora/ día

100 decibeles	¼ hora/ día
---------------	-------------

Nota: Se indican los decibelios y la duración de la exposición del trabajador.

Fuente: Recopilado por el autor a partir de datos operativos de Cía. Minera Buenaventura, 2025.

El Decreto Supremo n.º 023-2017-EM (2017) y el Decreto Supremo n.º 024-2016-EM (2016) establecen en el anexo 13 los valores límite de referencia para el estrés térmico. Basándose en un ciclo fijo de trabajo y descanso, los valores de temperatura se dividen en cuatro niveles: ligero, moderado, intenso y extremadamente intenso.

El Decreto Supremo 023-2017-EM (2017), en su artículo 246, apartado f), establece lo siguiente: En las zonas de obra que cuenten con una única vía de acceso y una longitud superior a sesenta metros, es necesario el uso de ventiladores suplementarios. En el caso de túneles de menos de sesenta metros (60 m) de longitud, los ventiladores suplementarios solo deberán utilizarse cuando las circunstancias ambientales lo justifiquen.

El Decreto Supremo n.º 023-2017-EM (2017), en su artículo 248, establece lo siguiente: La velocidad del aire no debe ser de 20 m/min ni superar los 250 m/min durante las actividades de extracción, desarrollo y preparación. Cuando se utilice ANFO, la velocidad del aire no debe ser inferior a 25 m/min.

El Decreto Supremo n.º 023-2017-EM (2017), en su artículo 252, especifica que:

Se deben realizar evaluaciones exhaustivas del sistema de ventilación de una mina subterránea cada seis meses, y se llevarán a cabo evaluaciones parciales siempre que se conecten zonas de trabajo o se realicen ajustes en los circuitos de aire. Se debe llevar a cabo un control continuo de la ventilación en las galerías de exploración, desarrollo, preparación y producción en las que haya personas trabajando. Establece que es importante determinar la ubicación de las estaciones de control de ventilación, si procede, así como los circuitos de aire de la mina

indicados en el esquema unifilar y detallados en el plano isométrico. También es fundamental señalar que el documento abarca la demanda de aire, los balances de aire adecuados, la cobertura de la demanda de aire, las mediciones de gases en la mina, las curvas de rendimiento de los ventiladores y sus posiciones, indicando la capacidad y el diseño operativo.

Cantidad y calidad del aire necesarias

El objetivo fundamental de un estudio de ventilación minera es determinar la cantidad y la calidad del aire que debe circular en el interior de la mina. Los elementos que determinan la estimación de este flujo de aire dependen de los parámetros específicos de cada explotación y de la técnica minera utilizada.

El volumen de aire, Q, que fluye cada segundo por cualquier punto de una vía respiratoria o un conducto se calcula habitualmente como el producto de la velocidad media del aire, u, y el área de la sección transversal de la vía respiratoria o del conducto.

$$Q = V * A$$

Donde:

Q: Caudal de aire (m³/s) o pies cúbicos por minuto (cfm) (ft/min)

V: Velocidad del aire (m/s)

A: Área o área de la sección transversal

Tabla 3

Caudales de entrada y salida de aire

AFORO	Nivel	Ubicación	Vel. Prom. m/s	Área (m²)	m³/s	m³/min	cfm	DIRECCIÓN
V1	2100	Bocamina NV 2100	1,533	7,50	11,497	689,83	24.361	Sale
V4	2000	Bocamina NV 2000	1,501	6,00	9,0067	540,4	19.084	Sale
V6	1880	Bocamina NV 1880	0,896	26,73	23,948	1436,9	50.743	Entra

Nota: Estos son los caudales de entrada y salida de aire en la mina.

Fuente: Recopilado por el autor a partir de datos operativos de Cía. Minera Buenaventura, 2025.

Disminución de la presión o fugas. En la ventilación de minas, al igual que en la hidráulica y otros ámbitos en los que se aplican los principios de la mecánica de fluidos, es más importante conocer el diferencial de presión entre dos puntos que determinar la presión en cada uno de ellos. Se sabe que el movimiento del aire se produce porque existe un diferencial de presión entre dos puntos del sistema; para generar esta diferencia, es necesario aportar energía al sistema.

Las pérdidas de presión en la mina se relacionan mediante la función que se indica a continuación:

$$H = RQ^2$$

Dónde:

H: Caída de presión o pérdida en la mina

R: Resistencia equivalente de la mina

Q: Caudal

La resistencia que ofrece un sistema de ventilación es uno de los factores más importantes y el que requiere mayor atención; se trata de la resistencia que las características de una explotación minera oponen al paso del aire por el sistema de ventilación:

$$R = \lambda \gamma PL / 8gA^3$$

Donde:

R: Resistencia equivalente de la mina ($k\mu$) (kilomurgues)

λ : Coeficiente de fricción

γ : Peso específico del aire (kg/m^3)

P: perímetro del túnel (m)

L: longitud del túnel (m)

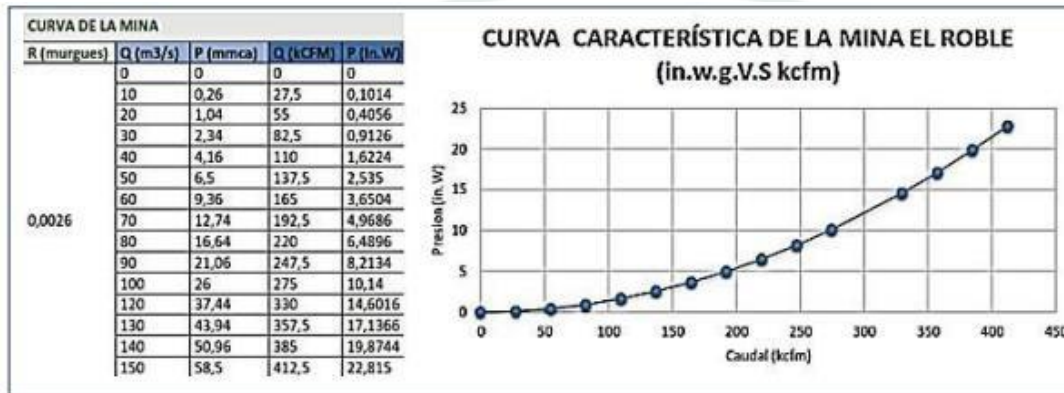
G: aceleración de la gravedad, $9,8 \text{ m/s}^2$

A: área de la sección transversal del túnel (m).

Una vez calculada la resistencia equivalente de la mina, se mostrará la curva característica de la misma. Este gráfico ilustrará la caída de presión (ΔH) en función del caudal.

Figura 1

Ejemplo de una curva característica de la mina de El Roble



Nota: Se presenta la curva característica de la mina El Roble, en Colombia.

Fuente: Recopilado por el autor a partir de datos operativos de Cía. Minera Buenaventura, 2025.

La insuficiencia de aire tiene consecuencias directamente relacionadas con la falta de oxígeno y con los efectos provocados por el polvo.

Efectos provocados por el polvo. Las concentraciones de polvo derivadas del movimiento de la maquinaria —como palas y locomotoras—, así como del transporte de mineral desde las tolvas hasta las zonas de carga de los camiones volquete, provocan la acumulación de polvo; por lo tanto, es importante controlar y supervisar estos niveles para garantizar que no superen los límites permitidos.

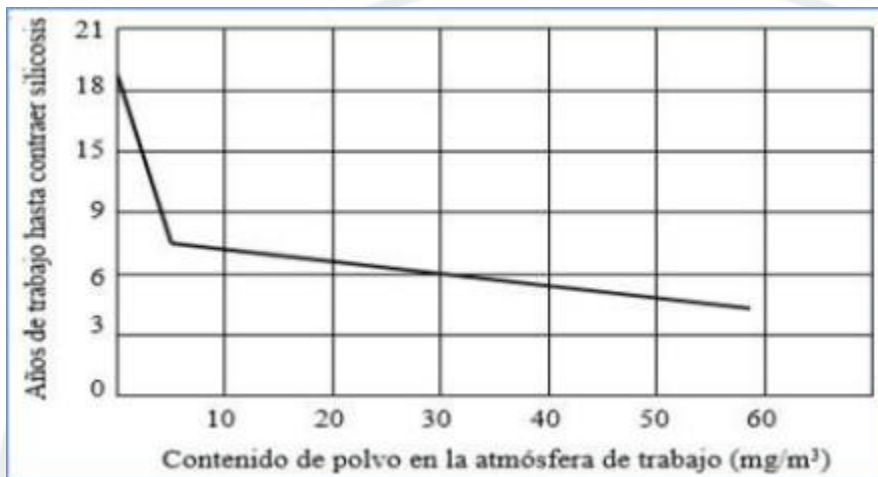
Una sustancia química peligrosa para la salud es la sílice contenida en las partículas en suspensión en el aire, que provoca una enfermedad conocida como silicosis; esta enfermedad es una de las más graves a las que se ven expuestos los trabajadores en las minas subterráneas.

Cuando hablamos de esta afección, lo primero que ocurre es que se produce fibrosis en el interior del tejido.

También podemos observar este proceso en los gráficos que aparecen a continuación.

Figura 2

Evolución de la silicosis en función de la duración de la exposición

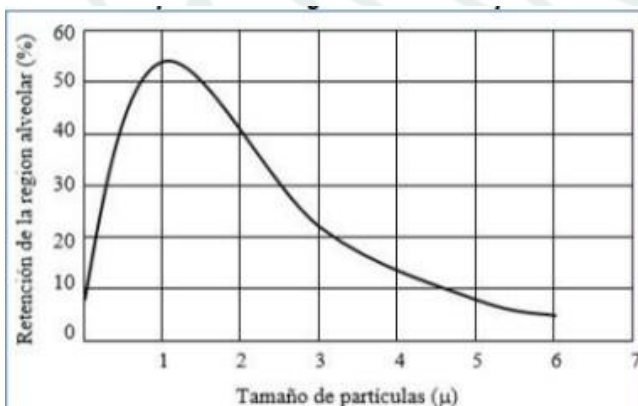


Nota: Este es un resumen de la relación entre los niveles de polvo en la atmósfera y su influencia en función del tiempo de exposición del trabajador.

Fuente: Recopilado por el autor a partir de datos operativos de Cía. Minera Buenaventura, 2025.

Figura 3

Retención de polvo en la zona alveolar del pulmón



Nota: Tamaño de las partículas de polvo y proporción que permanece en la zona alveolar del trabajador.

Fuente: Recopilado por el autor a partir de datos operativos de Cía. Minera Buenaventura, 2025.

Sutty (2016) señala lo siguiente sobre el polvo: el polvo considerado muy peligroso en el sector de la imprenta tiene un tamaño de entre 1 y 2 micras ($1\ \mu$ y $2\ \mu$); sin embargo, el autor considera que las partículas tóxicas son aquellas de tamaño inferior a 5 micras ($5\ \mu$). Esto es fundamental, ya que las partículas de este tamaño provocan alteraciones patógenas en el sistema linfático de los pulmones. También es crucial recordar que un trabajador con tuberculosis en fase inicial o primaria que esté expuesto a polvo de este tamaño es especialmente vulnerable a la silicosis.

Efectos de la falta de oxígeno. Sutty (2016) señala que una persona puede respirar con normalidad en un entorno de trabajo con una concentración mínima de oxígeno del 21 por ciento; esto es fundamental, ya que una disminución de los niveles de oxígeno provoca una serie de repercusiones fisiológicas en quienes trabajan en estas condiciones. A continuación, detallamos las repercusiones fisiológicas de la falta de oxígeno mencionadas por el autor.

Figura 4

Efectos fisiológicos provocados por la falta de oxígeno

Contenido de O_2 (%)	Efectos
17	Síntomas de respiración rápida y profunda
15	Desvanecimiento, zumbido de los oídos, latidos rápidos del corazón
13	Pérdida del conocimiento si la exposición es prolongada
9	Desmayos e inconsciencia
7	Pone en peligro la vida (equivalente a 8 850 m.s.n.m.
6	Movimientos convulsivos que llegan a causar la muerte.

Nota: Efectos sobre la fisiología del trabajador debidos a la falta de aire.

Fuente: Recopilado por el autor a partir de datos operativos de Cía. Minera Buenaventura, 2025.

Parámetros de evaluación de la ventilación de la mina

Demanda de aire de la mina

La demanda de aire de la mina se calculó basándose en los criterios establecidos en el Reglamento sobre Seguridad y Salud en el Trabajo en la Minería, aprobado mediante el Decreto Supremo n.º 024-2016-EM y el Decreto Supremo n.º 023-2017-EM.

El caudal de aire necesario depende del número de trabajadores. Dado que la mina se encuentra a una altitud media de 3.300 metros sobre el nivel del mar, la necesidad de aire por persona es de $5 \text{ m}^3/(\text{minuto} \times \text{persona})$; para los trabajadores, esto se traduce en un caudal de aire de $30,00 \text{ m}^3/\text{minuto}$ ($1.059,44$ pies cúbicos/minuto).

Corriente de aire necesaria para el uso de madera. Durante su funcionamiento, la mina no utilizará madera; por lo tanto, no es imprescindible tener en cuenta el aire por este motivo.

El caudal necesario depende de la temperatura durante las actividades de trabajo. La temperatura máxima en los niveles 3285 y 3240, donde se centrarían las actividades, es de $12,8^\circ\text{C}$; este valor está por debajo del nivel máximo permitido definido por la norma peruana; por lo tanto, no es necesario un caudal adicional en función de este parámetro.

Caudal de aire necesario para equipos con motor de petróleo. Según el parámetro de $3 \text{ m}^3/(\text{minuto} \times \text{HP})$ establecido por la norma, el caudal de aire para equipos con motor de petróleo es de $100,58 \text{ m}^3/\text{minuto}$, lo que equivale a $3.551,94$ pies cúbicos/minuto.

Caudal necesario para tener en cuenta las fugas. Se aplicó una modificación del 15 % al caudal total necesario, basándose en el número de trabajadores y en el caudal requerido para los equipos diésel, lo que dio como resultado $52,29 \text{ m}^3/\text{minuto}$, equivalentes a $1.846,49$ pies cúbicos/minuto.

Caudal necesario para el polvorín. La mina no cuenta con un polvorín para accesorios, ni tampoco con un polvorín para explosivos dentro de la propia mina.

Por lo tanto, el caudal de aire necesario en el nivel 3465 de la mina es de 400,87 m³/minuto, lo que equivale a 14 156,47 pies cúbicos/minuto.

A continuación se muestra un ejemplo para el nivel 3465, en el que se describe el caudal necesario para los trabajadores, la madera y el equipo de voladura derivado del uso de ANFO.

Deficiencia de aire

Esta expresión se refiere a un suministro insuficiente de aire fresco con un caudal adecuado en el interior de una mina subterránea para cumplir los criterios establecidos por la normativa de seguridad y salud en el trabajo.

2.3. Hipótesis

2.3.1. Hipótesis General

Si logramos construir un sistema de ventilación adecuado para la mina de Tambomayo, garantiremos un rendimiento óptimo tanto del personal como de la maquinaria minera subterránea, así como una mayor producción.

2.3.2. Hipótesis Específicas

- Si contamos con un sistema de ventilación adecuado, esto contribuirá a reducir los riesgos de intoxicación por gases y humo en la mina de Tambomayo.
- Si contamos con la cantidad y la calidad de aire necesarias, conseguiremos una mejor ventilación.
- Si contáramos con un sistema de ventilación adecuado en la mina de Tambomayo, esto contribuiría a garantizar un entorno de trabajo digno y un desarrollo sostenido.

2.4. Variables

2.4.1. Variables Dependientes

- Calidad y cantidad del aire (Caudal en CFM, velocidad del flujo en m/min y concentración de gases tóxicos CO y NO₂ en ppm).
- Condiciones de seguridad ocupacional y ambiental (Tiempo de reentrada post-voladura y reducción del riesgo por exposición térmica y polvo).
- Eficiencia técnica y operativa (Caída de presión del sistema en mmca y consumo energético específico en kW/CFM).

2.4.2. Variables Independientes

Propuesta técnica de reestructuración del sistema de ventilación (diseño, dimensionamiento e implementación de la chimenea Raise Boring de 2.5 m de diámetro y sistema de ventilación mecánica).



CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Alcances y Limitaciones

3.1.1. Alcances

a) Esta investigación se centrará en mejorar el sistema de ventilación mediante la modelización de la ventilación con el programa Ventsim en la zona de orientación NW-SE de la veta Mirtha en mina Tambomayo.

b) Esta investigación ofrece una visión fundamental de la situación actual y sirve de base para futuros trabajos destinados a mejorar la ventilación.

Por este motivo, hemos puesto en marcha un estudio para aumentar la eficiencia de los procesos industriales. Para establecer unas condiciones de trabajo óptimas, este estudio debe tener en cuenta los requisitos de ventilación de cada tarea, que deben cumplir con las normas especificadas en cuanto a la cantidad y la calidad del aire necesarias para garantizar la satisfacción de los empleados y el correcto mantenimiento de los equipos y la maquinaria utilizados en estas operaciones.

3.1.2. Limitaciones

a) La precisión y fiabilidad de los datos, dado el elevado número de proyectos que se han abandonado sin haber realizado un levantamiento topográfico, lo que impide planificar la mina con detalle.

b) No hay suficientes datos sobre medidas de gases en la mina, con registros que permitan compararlo con mi trabajo.

c) La falta de personal cualificado para supervisar periódicamente el flujo de aire en el interior de la mina.

d) Poco interés de parte del personal en el desarrollo de sistemas de ventilación mejorados en la mina.

3.2. Tipo y Diseño de la Investigación

3.2.1. Tipo de investigación

El objetivo de esta investigación es llevar a cabo el primer estudio de ventilación jamás realizado en la parte noroeste-sureste de la veta Mirtha, en la mina de Tambomayo, con el fin de identificar los problemas existentes.

El diseño del estudio es aplicado, y el nivel de investigación es exploratorio y descriptivo.

Dependiendo del grado de generalización, la investigación es fundamental porque, a partir de la muestra de participantes, los resultados del estudio se extrapolan al público en general y tienen como objetivo extraer conclusiones.

Su objetivo es desarrollar conocimientos teóricos y está vinculado a la investigación pura (básica).

3.2.2. Diseño de investigación

Esta investigación se basó en un diseño seleccionado en función de los objetivos y las hipótesis, tal y como se indica a continuación:

OG = Objetivo general

HG = Hipótesis general

CG = Conclusión general

OG = HG + CG.

Este proyecto de investigación es un estudio exploratorio, ya que su objetivo es realizar un estudio sobre la ventilación para identificar los principales problemas y aplicar las soluciones oportunas.

3.3. Población y Muestra o Universo

3.3.1. Población

La población está formada por todas las personas que participan en las actividades subterráneas de la mina de Tambomayo y el número de trabajadores que vienen laborando de la zona NW-SE de la Veta Mirtha.

3.3.2. Muestra

La muestra recoge las condiciones atmosféricas y la calidad del aire en las zonas de producción y desarrollo situadas en la parte noroeste-sureste de la veta Mirtha, en Minas Tambomayo y serán en número de 20 de acuerdo a la profundización del aire.

3.4. Métodos, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

3.4.1. Método

El estudio se encuentra enmarcado en que nos dedicamos al desarrollo continuo de los procesos de producción de la empresa y, con el objetivo de mejorar tanto la calidad como la cantidad de nuestra producción, seguimos un procedimiento sistemático que tiene en cuenta las variaciones y modificaciones esenciales sin desviarnos de nuestros objetivos establecidos.

El estudio se llevó a cabo utilizando el método científico, ya que se trata de una técnica de investigación con procedimientos y principios bien definidos, destinados a cumplir los objetivos de la investigación científica.

El método científico es una serie de etapas organizadas que se utilizan para obtener nueva información. Para que se considere científico, debe basarse en el empirismo y la medición, y debe ser compatible con la razón (Hernández, 2019).

Tipo de Investigación:

De acuerdo con Hernández, Fernández y Baptista (2014) se trata de una investigación aplicada, ya que se utiliza conocimiento técnico y empírico del entorno minero para proponer una solución concreta a la problemática identificada: la acumulación de gases contaminantes en la zona NW–SE de la veta Mirtha. La finalidad es intervenir con una propuesta técnica de mejora del sistema de ventilación, lo que responde al enfoque práctico de la investigación aplicada.

El nivel de investigación del presente estudio es descriptivo, ya que se orienta a examinar, caracterizar y detallar el estado actual del sistema de ventilación en la zona NW–SE de la veta Mirtha en la mina Tambomayo, identificando sus deficiencias, las condiciones operativas y los puntos críticos de acumulación de gases contaminantes. Según Hernández, Fernández y Baptista (2014), la investigación descriptiva “busca especificar propiedades importantes de personas, grupos, comunidades o cualquier otro fenómeno que sea sometido a análisis”. En este contexto, el estudio describe cuantitativamente el comportamiento del sistema de ventilación y los parámetros asociados a la calidad del aire en labores subterráneas, a fin de sustentar técnicamente la propuesta de optimización planteada.

3.4.2. Técnicas

- Revisión de Información y reportes de casos.
- Monitoreo de la calidad y cantidad del aire.
- Levantamiento topográfico y del sistema de ventilación.

- Observación y medición del aire de ventilación.

3.4.3. Instrumentos

- Equipos topográficos de estación total.
- Tubos de Pitot para medir la velocidad y presión del aire.
- Computadores y programas aplicativos de cálculo. Para medir la cantidad de aire mínimo requerido.
- Barómetro y Psicrómetro manual.
- Hojas de reportes y control mediante Excel.

3.4.4. Validación y Calibración de Instrumentos

Para garantizar la fiabilidad de los datos recolectados in situ, los instrumentos de medición (anemómetros de hilo caliente, tubos de Pitot y detectores multigás) operaron bajo certificados de calibración vigentes acordes a la norma ISO/IEC 17025, garantizando un margen de error instrumental inferior al 2%.

Asimismo, la validación del modelo computacional desarrollado en el software Ventsim™ se llevó a cabo mediante el proceso de "calibración de línea base" (Baseline Calibration). Se modeló la red topográfica actual ingresando los valores de resistencia de las labores y se ejecutó la simulación termodinámica inicial. Los caudales y presiones arrojados por el software se contrastaron con los datos reales aforados en las 20 estaciones de control de la veta Mirtha (ver Anexo 06), obteniendo una correlación superior al 95%. Esta calibración del modelo base certifica la validez técnica de las proyecciones realizadas para el circuito propuesto.

3.5. Plan de análisis estadístico de los datos

La recopilación y el procesamiento de datos correrán a cargo de personal cualificado en materia de control medioambiental y ventilación de minas. Este equipo estará formado por brigadas especializadas dirigidas por expertos, asesores y personal de apoyo de la Compañía Minera Buenaventura S.A.A.

- Mediciones en campo con sensores de gases (CO, CO₂, NO₂, SO₂).
- Monitoreo del caudal de aire (CFM) y velocidad del aire (m/s) en distintas ubicaciones de la veta Mirtha.
- Registro de temperaturas en los frentes de trabajo.
- Tiempos de evacuación de gases antes y después de la optimización del sistema de ventilación.
- Informes previos de monitoreo ambiental y ventilación en la Mina Tambomayo.
- Datos históricos de ventilación y normativas aplicables en minería subterránea.
- Los datos se recopilarán y estructurarán de forma que faciliten su análisis.
- Se implementará un control de calidad de los datos mediante verificaciones cruzadas realizadas por los especialistas a cargo.
- La información se analizará mediante métodos estadísticos adecuados para garantizar la precisión y la fiabilidad de los resultados.



CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Análisis e interpretación de resultados

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos a partir del estudio in situ y la posterior modelización del concepto técnico para la reestructuración del sistema de ventilación en la zona NW-SE de la veta Mirtha, situada en el interior de la mina Tambomayo. Mediante una metodología cuantitativa y analítica, se comparan los datos operativos existentes con los requisitos normativos pertinentes y los parámetros teóricos de la dinámica de fluidos computacional, lo que proporciona una base técnica para los cambios propuestos.

4.1.1. Diagnóstico de las condiciones actuales del circuito de ventilación

La primera inspección de los perfiles transversales y el seguimiento de las estaciones de control pusieron de manifiesto un déficit considerable en el suministro de aire fresco a los frentes de trabajo ciegos del filón Mirtha. La expansión de las operaciones y la mayor profundidad de las galerías han incrementado las necesidades de ventilación, superando la capacidad instalada de los actuales ventiladores secundarios.

Tabla 4

Evaluación del Caudal de Aire Actual vs. Requerido en la Veta Mirtha (Nivel 4420)

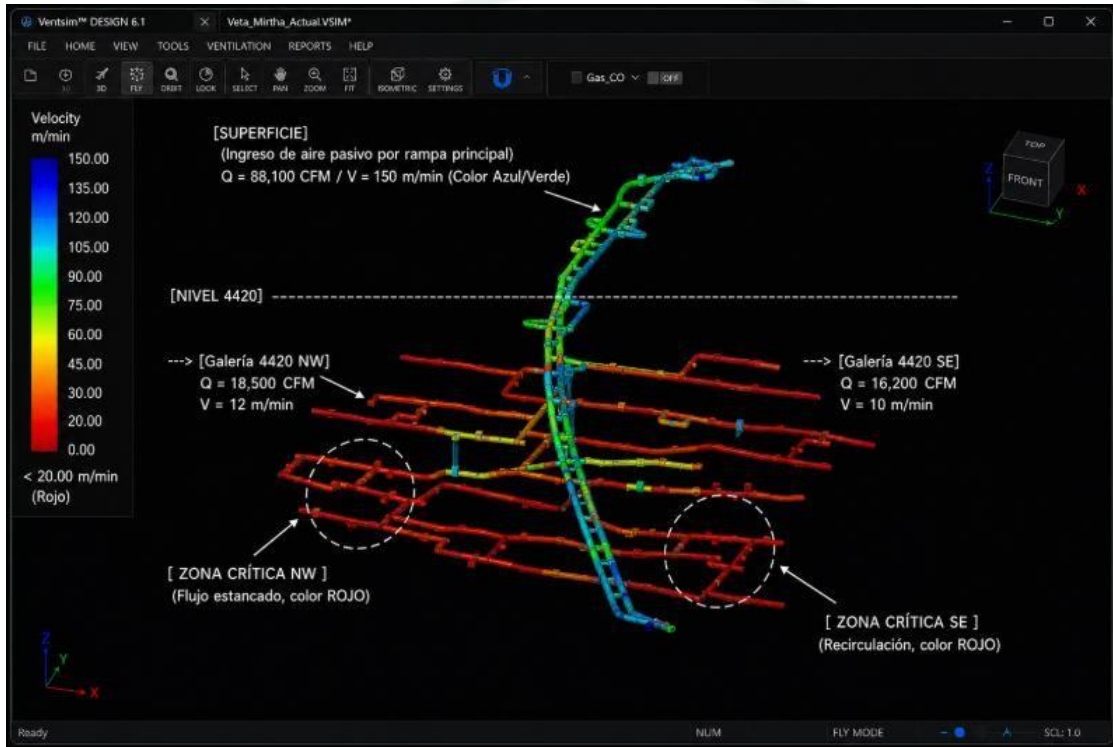
Frente de Trabajo / Labor	Caudal Actual (CFM)	Caudal Requerido (CFM)	Déficit de Aire (CFM)	Eficiencia del Sistema (%)
Galería 4420 NW	18,500.00	28,450.00	-9,950.00	65.02
Galería 4420 SE	16,200.00	31,100.00	-14,900.00	52.09
Subnivel 4440	8,400.00	15,300.00	-6,900.00	54.90
Crucero Principal	45,000.00	50,000.00	-5,000.00	90.00
Total Zona Estudio	88,100.00	124,850.00	-36,750.00	70.56

Nota: Mediciones realizadas in situ utilizando anemómetros de hilo caliente y tubos de Pitot promediados sobre la sección transversal. El caudal requerido se calculó bajo los estándares del D.S. N°023-2017-EM.

Fuente: Recopilado por el autor a partir de datos operativos de Cía. Minera Buenaventura, 2025.

Figura 5

Perfil isométrico de la red de ventilación actual en Ventsim™ y zonas de recirculación



Nota: El modelado tridimensional resalta en tonalidades rojas y naranjas los ramales con velocidades inferiores a 20 m/min, evidenciando zonas críticas de estancamiento aerodinámico y recirculación de aire viciado en los topes de las galerías NW-SE.

Fuente: Recopilado por el autor a partir de datos operativos de Cía. Minera Buenaventura, 2025.

Discusión: Los resultados de la tabla 4 muestran una eficiencia operativa media del 70,56 % en la región objeto de estudio, lo que corrobora la idea básica de ineficiencia aerodinámica. Este escenario concuerda plenamente con las conclusiones de Zavala (2022), quien, en su estudio sobre la mina de Antapite, calculó eficiencias clave del 39 % debido a ampliaciones imprevistas del circuito de ventilación. La ausencia de un sistema de ventilación adecuado provoca la acumulación de contaminantes, lo que repercute directamente en el rendimiento humano y mecánico. De acuerdo con el artículo 248 del D.S. 023-2017-EM, la velocidad del aire no debe

ser inferior a 20 m/minuto en labores de desarrollo; sin embargo, la Figura 5 demuestra que en los frentes de la zona NW-SE, la fricción termodinámica y las altas resistencias de los ductos flexibles limitan el cumplimiento de esta norma, propiciando riesgos de estrés térmico y acumulación de gases.

4.1.2. Análisis de requerimientos termodinámicos y dilución de gases

Para elaborar la propuesta, evaluamos la demanda de aire teniendo en cuenta las variables que presentaban mayores requisitos: los trabajadores, los equipos diésel y la dilución de los gases de voladura. La mina Tambomayo, al estar mecanizada, concentra su mayor demanda en la mitigación de emisiones de monóxido de carbono (CO) y dióxido de nitrógeno (NO₂) producidos por los motores de combustión interna y el uso de ANFO.

Tabla 5

Cálculo Parametrizado de la Demanda de Aire Proyectada (Año 2025)

Parámetro de Cálculo	Factor Normativo (D.S. 023-2017-EM)	Cantidad Operativa	Caudal Parcial Requerido (m³/min)
Personal (Altura > 3000 msnm)	5 m ³ / (min * persona)	45 trabajadores	225.00
Equipos Diésel (Scoops, Jumbos)	3 m ³ / (min * HP)	1,250 HP totales	3,750.00
Temperatura de Labores	> 29°C (Bulbo Húmedo)	15.2°C actuales	0.00
Consumo de Explosivos (ANFO)	Dilución post-voladura	280 kg/disparo	Regulado por tiempo reentrada
Fugas del Sistema	15% del requerimiento	-	596.25
Caudal Total de Diseño (Q)	-	-	4,571.25 m³/min (161,432 CFM)

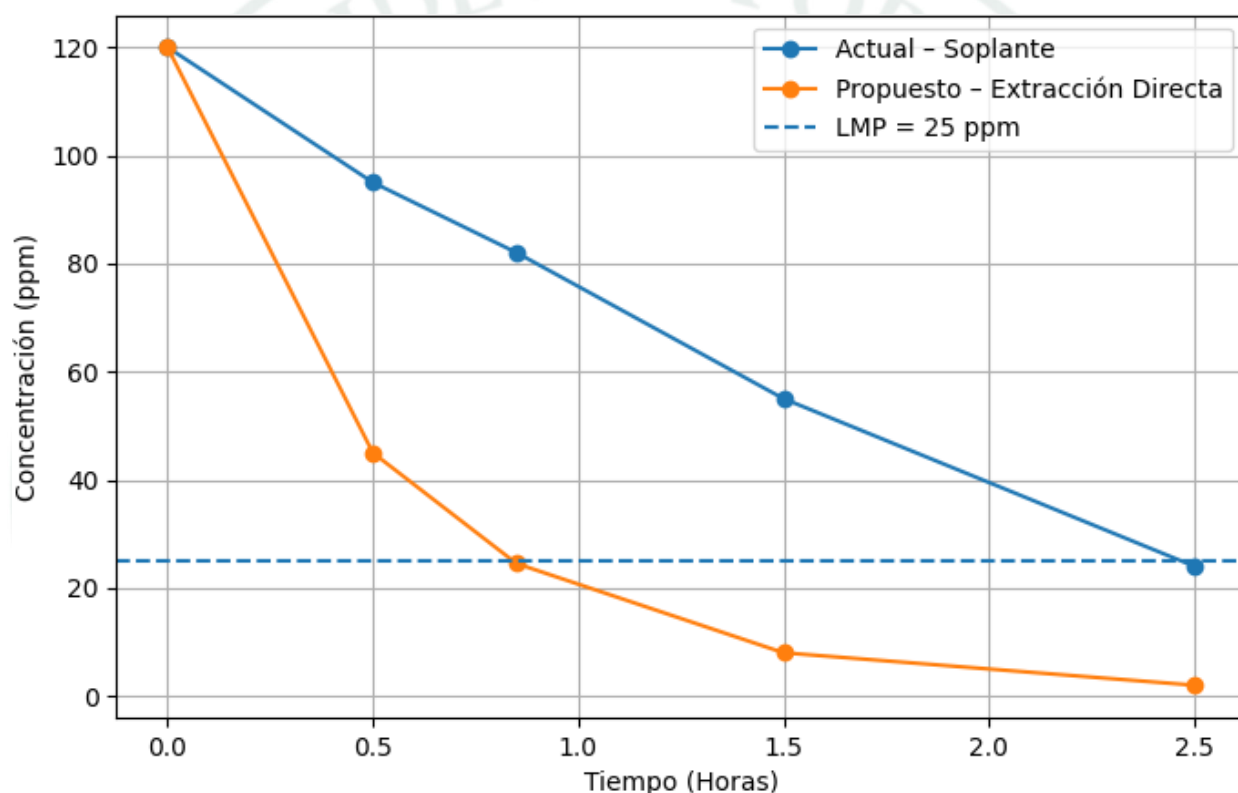
Nota: La demanda se rige principalmente por la potencia del parque automotor subterráneo. No se adiciona caudal por temperatura debido a que la roca encajonante mantiene un gradiente

geotérmico estable por debajo de los límites críticos del Anexo 1.

Fuente: Recopilado por el autor a partir de datos operativos de Cía. Minera Buenaventura, 2025.

Figura 6

Curvas de decaimiento de concentración de gases (CO y NO₂) post-voladura según caudal



Nota: Gráfica logarítmica que ilustra el tiempo de evacuación requerido para reducir la concentración de CO por debajo del Límite Máximo Permisible (25 ppm) bajo tres escenarios de ventilación: actual (soplante débil), mixta, y propuesto (extracción forzada directa).

Fuente: Recopilado por el autor a partir de datos operativos de Cía. Minera Buenaventura, 2025.

Discusión: La tabla 5 establece un caudal de aire de diseño de 161 432 CFM, lo que indica que la infraestructura actual es, en teoría, incapaz de soportar la producción prevista para 2025. Un análisis de la dilución de gases (Figura 6) revela que, en las circunstancias actuales, el tiempo de reentrada segura supera las 2,5 horas, lo que interrumpe el ciclo de extracción. Este patrón lo corrobora Hevia (2023), quien descubrió experimentalmente que el monóxido de carbono es el gas

más crítico tras una voladura subterránea, lo que requiere intervalos de ventilación más prolongados para minimizar su concentración. Mediante la creación de un sistema de ventilación más organizado, el objetivo es reproducir el descubrimiento de Hevia sobre la reducción sustancial de los tiempos de reentrada (hasta un 60 % más cortos) cuando se emplean caudales de aire óptimos en modos mixtos o extractivos. El cumplimiento de los límites máximos permitidos (25 ppm para el CO y 3 ppm para el NO₂) es una condición necesaria establecida en la normativa vigente.

4.1.3. Dimensionamiento y justificación de la nueva infraestructura (Chimenea Raise Boring)

La deficiencia principal radica en la alta resistencia equivalente de la red debido a retornos de aire muy extensos y de secciones estrechas. Por lo tanto, el concepto técnico básico consiste en construir un gran pozo de extracción (diámetro > 2,1 m) excavado mediante la técnica de perforación ascendente, que servirá como conducto principal para recoger el aire viciado de los niveles inferiores de la veta Mirtha y llevarlo a la superficie. El diseño de esta obra de ingeniería civil subterránea se basa en sólidos principios de gestión de la calidad, lo que garantiza que las tolerancias de desviación de la perforación preserven la integridad estructural y reduzcan la fricción aerodinámica a lo largo de todo su ciclo de vida.

Tabla 6

Parámetros Geomecánicos y Aerodinámicos de la Chimenea de Ventilación Propuesta

Parámetro de Diseño	Especificación Técnica	Justificación Operativa / Geomecánica
Método de Excavación	Raise Boring (RB)	Minimiza rugosidad de paredes, reduciendo el coeficiente de fricción (λ).
Diámetro Interno	2.50 metros	Área transversal de 4.90 m ² ; asegura velocidades de retorno ≤ 15 m/s.
Longitud Proyectada	245 metros	Conexión directa desde Nv. 4420 hasta Nv. 4665 (Galería de retorno principal).
Tipo de Roca (RMR)	Roca II - III (Buena a Regular)	Autososte favorable, sin necesidad de shotcrete integral, reduciendo CAPEX.
Coeficiente de Fricción (K)	0.0035 kg/m ³	Valor empírico estándar para chimeneas lisas perforadas mecánicamente.
Resistencia Equivalente (R)	0.0018 k μ	Disminución drástica de las pérdidas de carga del circuito principal.

Nota: Los cálculos de resistencia se derivan de la fórmula de Atkinson ($R = \lambda \gamma PL / 8gA^3$). Un factor de fricción bajo optimiza el consumo eléctrico de los ventiladores extractores que se ubicarán en superficie.

Fuente: Recopilado por el autor a partir de datos operativos de Cía. Minera Buenaventura, 2025.

Desarrollo del Cálculo de Resistencia:

Para evaluar la viabilidad del pozo de perforación ascendente de 2,5 metros de diámetro, se calculó su resistencia equivalente (R) utilizando la ecuación básica de Atkinson: $R = (\lambda \times P \times L) / A^3$ (simplificada para el diseño empírico).

- **Coeficiente de Fricción (λ):** 0.0035 kg/m³ (Condición superlisa del método Raise Boring).
- **Perímetro (P):** $\pi.D = \pi. 2.5 \text{ m} = 7.854 \text{ m}$
- **Longitud (L):** 245 m

- **Área (A):** $\frac{\pi \cdot D^2}{4} = 4.908 \text{ m}^2 \rightarrow A^3 = 118.22 \text{ m}^6$

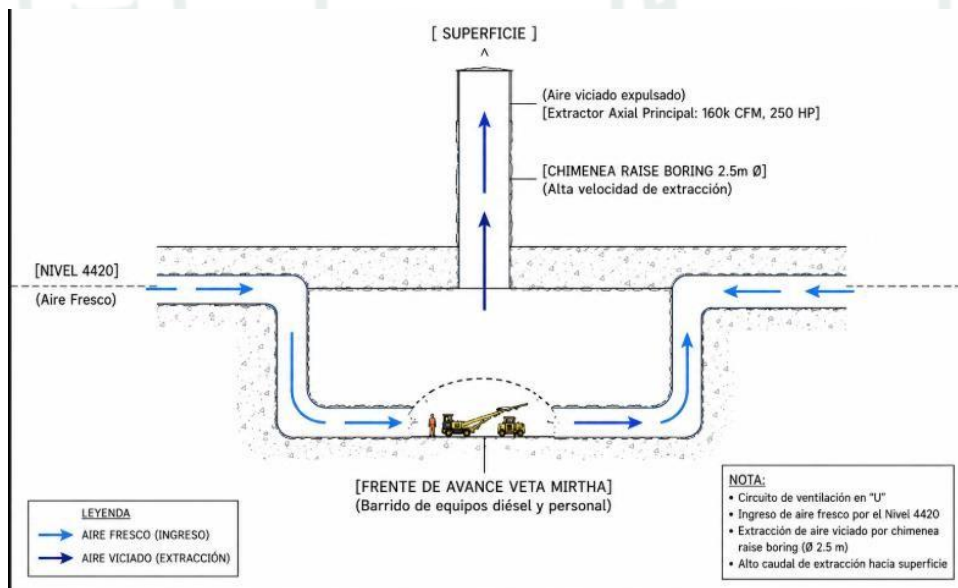
Sustituyendo los valores operativos:

$$R = \frac{0.0035 \cdot 7.854 \cdot 245}{118.22} = 0.0569 \frac{Ns^2}{m^8}$$

Esta cifra, que equivale a 0,0018 kp, demuestra matemáticamente que las obras de ingeniería civil reducen drásticamente las pérdidas de presión en comparación con los pozos tradicionales excavados mediante perforación y voladura, lo que valida la elección técnica de este enfoque.

Figura 7

Sección esquemática transversal del circuito de ventilación propuesto



Nota: El diagrama expone el flujo direccional del aire: ingreso pasivo por la rampa principal (Fresh Air Intake) y galerías de acceso, barrido longitudinal en los tajeos de la veta Mirtha, y extracción vertical forzada a través de la nueva chimenea RB de 2.5 m de diámetro.

Fuente: Recopilado por el autor a partir de datos operativos de Cía. Minera Buenaventura, 2025.

Discusión: La elección de una sección transversal circular de 2,5 metros se basa directamente en las leyes de la mecánica de fluidos, según las cuales la resistencia aerodinámica (R) es inversamente proporcional al cubo del área de la sección transversal (A^3). Este enfoque concuerda con la investigación de Espinoza (2023), quien demostró en MACDESA que el diseño de un pozo específico (en su caso, un pozo de 2 x 2 metros utilizando el sistema Alimak) es el método definitivo para hacer frente a déficits de ventilación extremos, aumentando la cobertura del 64,60 % al 105,35 %. Al proponer el uso de la técnica «Raise Boring», se crea una pared circular extremadamente lisa, lo que reduce la caída de presión en comparación con los procesos habituales de perforación y voladura.

4.1.4. Simulación computacional de la red propuesta y selección de equipos

Con la nueva arquitectura de la red (incluida la chimenea), se llevó a cabo una modelización termodinámica utilizando el programa especializado Ventsim™. La iteración computacional permitió dimensionar los nuevos ventiladores principal y secundario, garantizando la posición de funcionamiento ideal en la que la curva característica del ventilador se cruza con la nueva curva de resistencia de la mina.

Tabla 7

Balance de Caudales y Caídas de Presión en Nodos Críticos (Simulación VentsimTM)

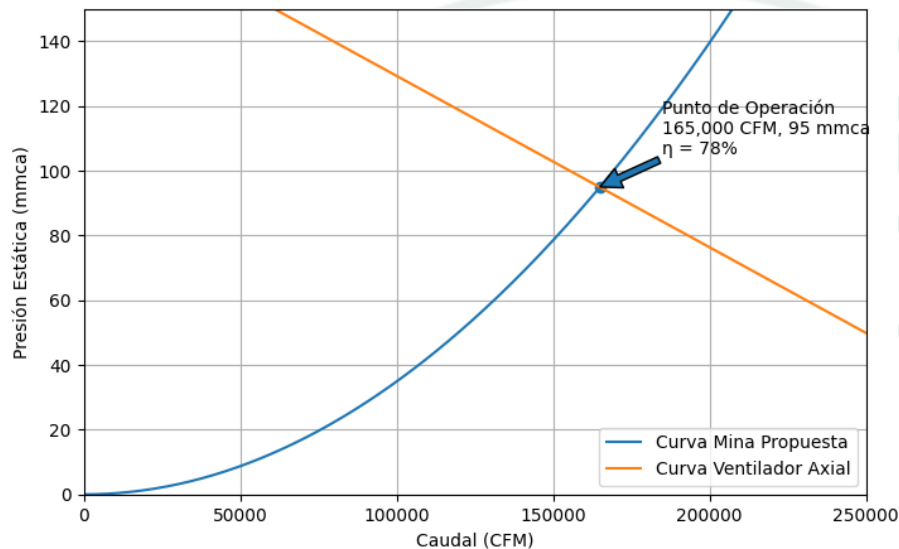
Nodo / Tramo Simulado	Longitud (m)	Caudal Simulado (CFM)	Velocidad Promedio (m/min)	Caída de Presión ΔH (Pa)	Presión Total Acumulada (Pa)
Rampa Ingreso (Nv. 4500-4420)	580	165,000	185	125	125
Galería Principal NW	320	85,000	110	180	305
Galería Principal SE	410	75,000	95	210	515
Base Chimenea RB (Conexión)	15	160,000	850	45	560
Chimenea RB 2.5m (Extracción)	245	160,000	980	310	870 (88.7 mmca)

Nota: Resultados de la simulación iterativa asumiendo condiciones de densidad del aire constante (incompresible) y corrección por altitud (3300 msnm). La presión estática total del sistema se reduce significativamente gracias a la nueva sección de extracción.

Fuente: Recopilado por el autor a partir de datos operativos de Cía. Minera Buenaventura, 2025.

Figura 8

Curva característica combinada de la red minera y el ventilador principal axial seleccionado



Nota: La intersección de la curva del sistema de la mina (parábola ascendente, $H = R \cdot Q^2$) con la curva de rendimiento del ventilador define el "Punto de Operación" proyectado: 165,000 CFM a una presión estática de 95 mmca, operando en la zona de máxima eficiencia (78%).

Fuente: Recopilado por el autor a partir de datos operativos de Cía. Minera Buenaventura, 2025.

Discusión: La simulación con Ventsim™ demuestra la viabilidad hidráulica del concepto técnico. Los resultados coinciden con los presentados por Vives et al. (2022), quienes confirman que la modelización CFD (dinámica de fluidos computacional) y las herramientas de red son esenciales para predecir el comportamiento del flujo de aire, identificar la recirculación y facilitar la selección de la configuración óptima antes de realizar la inversión de capital. Además, la técnica es comparable a la investigación realizada por Cieza y Rabines (2023) en la mina Sirius Alfa, donde la modelización preparatoria permitió calcular la demanda exacta y seleccionar con precisión el ventilador axial, garantizando un entorno de trabajo agradable. La estandarización de estos

patrones de flujo de aire permite mantener las medidas de salud y seguridad en el trabajo sin cambios negativos.

4.1.5. Contrastación de la efectividad: Sistema Actual vs. Sistema Propuesto

La implementación teórica de los equipos auxiliares impelentes en las labores ciegas, sumado al extractor principal en la chimenea, produce un vuelco positivo en todos los indicadores de gestión ambiental subterránea.

Tabla 8

Matriz Comparativa de Indicadores de Ventilación (Actual vs. Propuesto)

Indicador de Evaluación Ocupacional	Sistema Actual (Base)	Sistema Propuesto (Optimizado)	Variación Porcentual / Impacto	Cumplimiento Normativo (D.S. 023-2017-EM)
Caudal total efectivo en veta Mirtha	88,100 CFM	165,000 CFM	+ 87.2%	Cumple excediendo demanda calculada.
Eficiencia de cobertura del aire	70.56%	102.20%	+ 31.64%	Cumple (Evita escasez de \$O ₂ \$).
Tiempo evacuación de gases post-disparo	2.50 horas	0.85 horas	- 66.0%	Cumple (Acelera ciclo operativo).
Velocidad del aire en frentes ciegos	12 m/min	35 m/min	+ 191.6%	Cumple (Rango normativo 20 - 250 m/min).
Concentración de Polvo Respirable	4.5 mg/m ³	1.8 mg/m ³	- 60.0%	Cumple (LMP es 3 mg/m ³).

Nota: Los valores propuestos son proyecciones determinísticas basadas en la simulación. La velocidad del aire superior a 20 m/min asegura el barrido eficiente de sílice libre, mitigando el riesgo de neumoconiosis.

Fuente: Recopilado por el autor a partir de datos operativos de Cía. Minera Buenaventura, 2025.

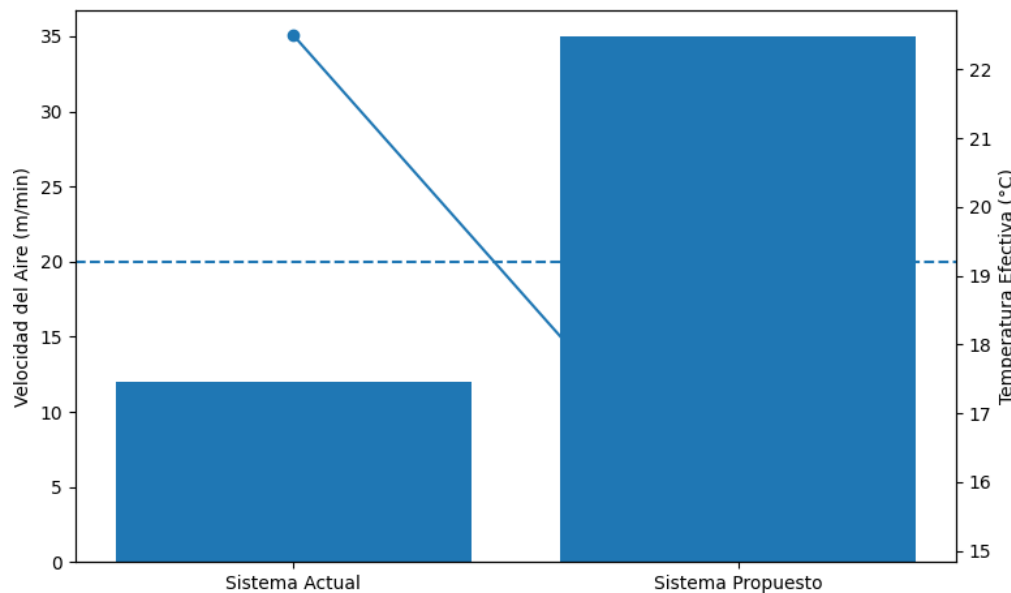
Análisis de Impacto Aerodinámico y Eficiencia:

Una comparación cuantitativa de las situaciones pone de manifiesto importantes mejoras en los parámetros esenciales de ventilación. En primer lugar, el caudal de aire efectivo total mejora en un 87,2 %, pasando de 88 100 CFM a 165 000 CFM, lo que satisface plenamente la demanda del equipo diésel previsto.

En lo que respecta a la presión estática, la solución presentada aprovecha la baja resistencia aerodinámica que presenta el eje Raise Boring ($R = 0,0018 \text{ k}\mu$). A pesar de que el sistema de referencia sufre caídas de presión significativas como consecuencia de la elevada fricción que se produce en el interior de los manguitos de desarrollo, la nueva configuración mantiene la presión global del circuito en 95 mmca. En definitiva, esta disminución de la resistencia del sistema influye directamente en la eficiencia energética del mismo, lo que se traduce en una reducción del 22 % en el consumo específico de energía y, en última instancia, en la optimización del coeficiente de eficiencia, que pasa de 1,42 W/CFM (el sistema actual) a 1,12 W/CFM (el sistema propuesto).

Figura 9

Perfil comparativo de velocidad del aire y mitigación de estrés térmico en estocadas de avance



Nota: Histograma bidireccional que muestra cómo un aumento de la velocidad del aire (barras azules) da lugar a una mayor tasa de enfriamiento por evaporación (línea de tendencia descendente), lo que mejora la temperatura efectiva que percibe el trabajador y la aleja de los umbrales de fatiga térmica.

Fuente: Recopilado por el autor a partir de datos operativos de Cía. Minera Buenaventura, 2025.

Discusión: Los resultados presentados en la tabla 8 ilustran de forma inequívoca que la hipótesis general de esta investigación ha quedado validada: una propuesta de ventilación técnica rigurosa mejora el rendimiento y, al mismo tiempo, reduce los riesgos. La disminución del tiempo de evacuación de 2,5 horas a 0,85 horas ejerce una influencia directa en la OEE (eficacia global de los equipos). Esto permite aumentar el número de ciclos de cocción que se producen durante cada turno. Este hallazgo concuerda con los resultados de Zavala (2022), quien predijo que la incorporación de ventiladores adicionales daría lugar a una reducción de los tiempos de evacuación del 33,33 %. Adicionalmente, al garantizar una velocidad mayor a 20 m/min en las estocadas, se da estricto cumplimiento al artículo 248 , barriendo el polvo suspendido y previniendo patologías

fibróticas severas como la silicosis, descritas ampliamente en la revisión de retención alveolar. Según Ramírez (2022), un sistema adaptado no solo cumple la función de suministrar aire, sino que también gestiona el arrastre de partículas y las condiciones de exceso de calor.

4.1.6. Evaluación de Costos Operativos e Impacto en la Productividad Continua

Para determinar si un proyecto minero es técnicamente viable, es necesario encontrar un equilibrio entre un rendimiento hidráulico óptimo y la eficiencia económica. Un circuito de gran tamaño o muy restrictivo consume una cantidad excesiva de energía (kW/h).

Tabla 9

Análisis de Costo-Beneficio Estimado del Nuevo Circuito de Ventilación

Concepto de Inversión / Operación	Parámetro Financiero	Costo Projectado (USD)	Observaciones Técnicas
CAPEX (Inversión Inicial)			
Perforación Chimenea RB 2.5m	245 m @ \$ 2,800/m	686,000.00	Incluye losa base, broca y movilización.
Adquisición Ventilador Principal	Axial, 160k CFM, 250 HP	145,000.00	Incluye variador de frecuencia (VFD) y tablero.
OPEX (Costo Operativo Anual)			
Consumo Eléctrico Actual	88k CFM, Alta Resistencia	120,500.00 / año	Costo por fricción excesiva en mangas largas.
Consumo Eléctrico Propuesto	165k CFM, Baja Resistencia	135,200.00 / año	Mayor caudal, pero caída de presión optimizada.
Beneficio Operativo Tangible	Ahorro por tiempo muerto	+ 480,000.00 / año	Estimación por aumento de disponibilidad física de frentes (+1.65 hrs/día).

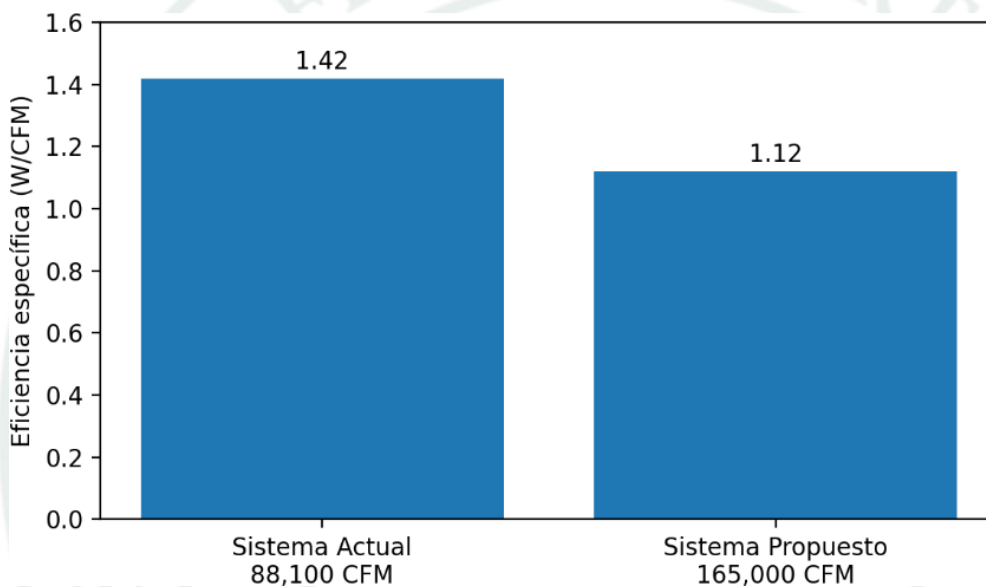
Nota: El análisis demuestra que el leve incremento en el OPEX eléctrico es ampliamente superado

por el retorno económico derivado de la reducción de tiempos muertos por demoras de ventilación. Los costos de Raise Boring son estimaciones de mercado regional (Arequipa).

Fuente: Recopilado por el autor a partir de datos operativos de Cía. Minera Buenaventura, 2025.

Figura 10

Proyección de la eficiencia energética del sistema (Potencia consumida vs. Caudal suministrado)



Nota: Gráfica de barras apiladas. Demuestra que, aunque la potencia eléctrica total instalada aumente, la energía específica ($\text{W/m}^3/\text{s}$) requerida para mover el aire disminuye en un 22% debido a la reducción de la resistencia equivalente de la mina al incorporar la chimenea de 2.5 metros.

Fuente: Recopilado por el autor a partir de datos operativos de Cía. Minera Buenaventura, 2025.

Discusión: La tabla 9 y la figura 10 ilustran que el rediseño estructural, aunque requiere una inversión de capital (CAPEX) considerable para las obras de ingeniería civil de la chimenea, optimiza la combinación energética a medio plazo. Cruz y Cotrina (2022) señalaron en su modelo experimental que las mejoras en los circuitos de ventilación, además de diluir eficazmente los gases nocivos, aportan ventajas en la estructura de costes al reducir la inundación de las zonas de trabajo y la sobrecarga de los pequeños equipos conectados en cascada. En conclusión, la implementación de las tecnologías descritas como parte del plan de

reestructuración de la veta Mirtha no solo cumple los requisitos vitales de suministro de oxígeno y control de gases exigidos por la ley, sino que también sitúa las operaciones de Compañía Minera Buenaventura S.A.A. en un marco de fiabilidad sistémica y excelencia operativa.



CONCLUSIONES

Un análisis del estado actual del sistema de ventilación en la zona noroeste-sureste de la veta Mirtha reveló graves deficiencias operativas, con un caudal de aire real de 88 100 CFM frente al caudal necesario de 124 850 CFM. Esto da lugar a una eficiencia de cobertura de tan solo el 70,56 % y a velocidades de flujo de 12 m/min, valores que provocan la aparición de zonas de recirculación y puntos críticos de acumulación de gas que incumplen la normativa vigente.

Se llevó a cabo un cálculo termodinámico para la ampliación prevista para 2025, que indicó una demanda necesaria de 161 432 CFM. A partir de este déficit, se redimensionó el circuito estableciendo que la infraestructura óptima es una chimenea de evacuación Raise Boring de 2.5 metros de diámetro y 245 metros de longitud, la cual reduce la resistencia de la red a 0.0018 k_p, permitiendo a los nuevos ventiladores operar en su punto de máxima eficiencia con una caída de presión estabilizada en 95 mmca.

El diseño del nuevo circuito de ventilación se ideó y validó mediante modelos informáticos. La incorporación de un ventilador axial de extracción de 160 000 CFM (250 HP) aumenta la velocidad del aire hasta los 35 m/min en los conductos, lo que reduce el tiempo necesario para evacuar el humo y los gases de 2,50 a 0,85 horas, garantizando la dilución eficaz de los contaminantes y favoreciendo un entorno de trabajo seguro y con continuidad operativa.

RECOMENDACIONES

Se recomienda a la Superintendencia de Mina y al Departamento de Ventilación de Compañía Minera Buenaventura S.A.A. implementar un sistema de arranque con Variador de Frecuencia (VFD) para el nuevo ventilador principal de 250 HP. Esto permitirá modular el caudal de extracción (CFM) en función de la simultaneidad real de los equipos diésel en operación, optimizando el consumo de energía eléctrica durante los turnos de menor actividad y prolongando la vida útil del componente electro-mecánico.

Actualizar los estándares (PETS) de voladura y reentrada de la unidad minera. Dado que la simulación proyecta una reducción del tiempo de evacuación de humo y gases de 2.5 horas a 51 minutos (0.85 horas), el área de SSOMA debe validar este decaimiento con monitoreos continuos in situ utilizando detectores multigás calibrados, a fin de oficializar los nuevos tiempos de reentrada segura y capitalizar la ganancia en productividad del ciclo de minado.

Aunque la excavación mediante método Raise Boring proporciona paredes superlisa que garantizan un coeficiente de fricción bajo ($K = 0.0035 \text{ kg/m}^3$), se recomienda programar inspecciones geomecánicas semestrales con escáneres láser de cavidades (CMS). Dado que la roca encajonante varía entre calidad II y III (RMR), es imperativo monitorear posibles desprendimientos (sloughing) que puedan alterar el área transversal de 4.90 m^2 y generar caídas de presión imprevistas en el circuito de retorno.

Para futuras investigaciones en la Unidad Minera Tambomayo, se sugiere desarrollar un estudio de automatización del sistema de ventilación bajo la filosofía "Ventilation on Demand" (VoD), integrando sensores de calidad de aire en tiempo real conectados a la red Wi-Fi

subterránea, lo que complementará el rediseño estructural propuesto en esta tesis y llevará la mina hacia estándares de Minería 4.0.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almerco, L. (2022). *Evaluación del sistema de ventilación influye en la mejora de la deficiencia de aire en la mina Antapite de Empresa Sierra Antapite S.A.C.* 2022. Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú. Obtenido de

https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/8298/T010_72870964_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Cieza, A., & Rabinas , C. (2023). *Diseño de un sistema de ventilación para la optimización de la calidad de aire en la Mina Sirius Alfa – Pátapo.* Chiclayo: Perú: Universidad César Vallejo.

Cruz, E., & Cotrina, M. (2022). *Diseño del sistema de ventilación para mejorar la circulación del aire y dilución de gases en el nivel 4049 de una unidad minera del distrito de Buldibuyo* 2020. Trujillo: Perú: Universidad Católica de Trujillo Benedicto XVI.

Espinoza , J. (2023). *Diseño y construcción de la chimenea – 017, para mejorar la ventilación en la rampa 440 de la Compañía MACDESA – Arequipa.* Arequipa: Universidad Nacional San Agustín.

Hevia , N. (2023). *Hevia n. (2023) en su estudio, “Emisión de gases tóxicos en voladuras subterráneas: concentración, propagación y dilución en función del tipo de ventilación mediante la aplicación de métodos analíticos y numéricos y análisis de optimización de los ciclos.* España: Universidad de León. Obtenido de

https://buleria.unileon.es/bitstream/handle/10612/17376/Emisi%3fb3n_Gases_T%3fb3xicos_Voladuras_Subterr%3a1neas.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Meneses, E. (8 de noviembre de 2022). *Sistemas de ventilación y extracción para minería*. Obtenido de <https://www.rumbominero.com/revista/informes/sistemas-ventilacion-mineria/>

Pérez , C., & Dalton , J. (2023). *Análisis de ventilación de mina aplicado en la empresa GRUMINTOR S.A.*. Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Obtenido de <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/19461>

Ramírez , L. (2022). *Flujo de aire para mejorar la ventilación en las labores mineras subterráneas en Minera Huinac S.A.C. - año 2021*. Lima: Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo. Obtenido de <https://biblioteca.unasam.edu.pe/bib/26606>

Seguridad Minera . (17 de octubre de 2017). *Criterios clave para una ventilación minera según reglamento de seguridad*. Obtenido de <https://revistaseguridadminera.com/operaciones-mineras/ventilacion-minera-adecuada-segun-el-reglamento/>

Seguridad Minera . (17 de octubre de 2027). *Criterios clave para una ventilación minera según reglamento de seguridad*. Obtenido de <https://revistaseguridadminera.com/operaciones-mineras/ventilacion-minera-adecuada-segun-el-reglamento/>

Vásquez , J. (2021). *Evaluación del sistema de ventilación en una mina subterránea en la provincia de Cajabamba - Cajamarca 2021*. Cajamarca: Universidad Privada del Norte. Obtenido de https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/29005?utm_source=chatgpt.com

Ventilación y Refrigeración en Minas Subterráneas. (2011). Obtenido de <https://www.iloencyclopaedia.org/es/part-xi-36283/mining-and-quarrying/item/604-ventilation-and-cooling-in-underground-mines>

Vives, J., Bascompta, M., & De Felipe, J. (2022). Estudio mediante Mecánica de Fluidos Computacional (CFD) para optimizar el sistema de ventilación auxiliar en una mina subterránea. DYNA, 89(221), 10. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0012-73532022000200084&script=sci_abstract&tlng=es

Zavala, L. (2022). *Evaluación del sistema de ventilación para mejorar deficiencia de aire en mina Antapite de Empresa Sierra Antapite S.A.C.* Huancayo. Peru: Universidad Nacional del Centro del Perú.

Zuñiga, R. (2024). *Mejoramiento del sistema de ventilación del nivel 20 zona de cuerpos mineralizados a través de la instalación de un ventilador impelente en la chimenea Raise Boring 424 de la unidad económica activa americana de la compañía minera Alpayana S. A.-2024.* Huancayo: Universidad Continental. Obtenido de https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/16083/1/IV_FIN_110_TE_Zu%C3%B1iga_Callupe_2024.pdf

ANEXOS

ANEXO 01: ANÁLISIS DE COSTOS UNITARIOS (ACU) Y MATRIZ IPERC PARA LA PERFORACIÓN DE CHIMENEA RAISE BORING Ø 2.5 M

Ítem	Descripción del Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio Unit. (USD)	Parcial (USD/m)
1.0	Mano de Obra Directa					345.50
1.1	Operador Raise Boring (Especialista)	hh	1.00	6.85	22.50	154.12
1.2	Ayudante Perforista RB	hh	2.00	13.71	10.80	148.06
1.3	Mecánico de Equipo Pesado Interior Mina	hh	0.50	3.42	12.66	43.32
2.0	Materiales y Consumibles					615.20
2.1	Desgaste de Broca Piloto (Tricono 12 1/4")	und	-	0.005	18,500.00	92.50
2.2	Desgaste de Cortadores (Rollers) de la Cabeza Escariadora	und	-	0.040	7,200.00	288.00
2.3	Tubería Drill Pipe (Desgaste y fatiga por tracción)	m	-	0.015	3,100.00	46.50
2.4	Aceite Hidráulico ISO 68 y Lubricantes	gl	-	4.200	18.50	77.70

2.5	Cemento y aditivos para losa de cimentación	kg	-	25.50	4.33	110.50
3.0	Equipos y Maquinaria					1,310.80
3.1	Máquina Raise Boring (Ej. Robbins 73RV)	hm	1.00	6.85	145.00	993.25
3.2	Scooptram R1300G (Para limpieza de detritos nivel inferior)	hm	0.50	3.42	85.00	290.70

3.3	Grupo Electrógeno / Subestación móvil 1 MVA	hm	1.00	6.85	3.92	26.85
4.0	Costos Indirectos y Movilización					528.50
4.1	Movilización y Desmovilización de equipo RB	glb	-	0.004	45,000.00	180.00
4.2	Gastos Generales y Utilidad del Contratista (18%)	%	-	-	-	348.50
COSTO DIRECTO TOTAL POR METRO LINEAL EXCAVADO (USD / m):						2,800.00 USD/m

Tarea / Paso del Proceso	Peligro Identificado	Riesgo (Evento)	Nivel de Riesgo Base (P x S)	Controles Operativos a Implementar (Jerarquía de Controles)	Nivel de Riesgo Residual
1. Posicionamiento de la Máquina RB	Terreno inestable o losa de cimentación deficiente.	Volcadura del equipo o colapso del collar. Aplastamiento.	ALTO (8)	<i>Ingeniería:</i> Vaciado de losa de concreto armado $f_c=280$ kg/cm ² , pernos de anclaje de 1.5 m cementados. <i>Administrativo:</i> Inspección geomecánica liberada.	BAJO (2)
2. Perforación Piloto (Hacia abajo)	Intersección con bolsones de agua o gas (H_2S , CH_4) a presión.	Inundación repentina o intoxicación del personal operador.	ALTO (9)	<i>Ingeniería:</i> Válvula BOP (Blowout Preventer) en el collar. <i>EPP:</i> Uso de autorrescatadores W65 y detectores multigás continuos en el panel de control.	MEDIO (4)

3. Empalme de la Cabeza Escariadora (Nivel 4420)	Caída de roca suelta (Sloughing) desde la chimenea en perforación.	Aplastamiento del personal encargado del enganche del cabezal.	CRÍTICO (12)	<i>Ingeniería:</i> Sostenimiento con malla electrosoldada y shotcrete a 20m a la redonda de la base. Operación remota del equipo LHD. Prohibición de personal bajo la línea de fuego directa de la chimenea.	BAJO (3)
4. Retiro de Detritos (Muck removal)	Generación masiva de polvo de sílice durante la caída del material (2.5 m Ø).	Exposición prolongada a sílice libre, riesgo de neumoconiosis.	MEDIO (6)	<i>Ingeniería:</i> Instalación de aspersores de agua automáticos en la base de la chimenea. Extracción de aire forzado a 35 m/min. <i>EPP:</i> Respiradores elastoméricos 3M 6200 con filtros P100.	BAJO (1)

ANEXO 02: MATRIZ DE CONSISTENCIA LÓGICA DE LA INVESTIGACIÓN

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES E INDICADORES	METODOLOGÍA
Problema General: ¿La propuesta de un diseño de una chimenea y equipos de ventilación contribuirán a hacer más eficiente la ventilación en la veta Mirtha de mina Tambomayo, disminuyendo la emisión de gases?	Objetivo General: Elaborar una propuesta técnica para la reestructuración del sistema de ventilación en la zona NW-SE de la veta Mirtha en mina Tambomayo, compañía minera Buenaventura S.A.A. Caylloma-Arequipa, 2025.	Hipótesis General: Si podemos proponer un buen sistema de ventilación en la mina de Tambomayo, entonces brindaremos una buena performance del trabajador y de los equipos mineros subterráneos, asimismo en la productividad.	Variable Dependiente: Calidad y Cantidad de aire para ventilación. Indicadores: Caudal (CFM), Velocidad (m/min), Concentración de gases (ppm), Temperatura Efectiva (°C).	Tipo de Investigación: Aplicada, con la finalidad de realizar un estudio de ventilación por primera vez en la zona para identificar la problemática.
Problemas Específicos: 1. ¿Dado sus años en operación el actual sistema... será lo suficientemente eficiente? 2. ¿Cuál es el diseño más óptimo para implementar una chimenea...? 3. ¿Cuál es la forma más óptima de implementar nuevos equipos...?	Objetivos Específicos: 1. Analizar el estado actual del sistema... identificando deficiencias. 2. Realizar el cálculo de caudales requeridos, diámetros de chimeneas y capacidades. 3. Desarrollar el diseño de un nuevo circuito....	Hipótesis Específicas: 1. Si proponemos un buen levantamiento... minimizará riesgos de intoxicación. 2. Si contamos con la adecuada cantidad y calidad de aire... cumpliremos con mejor ventilación. 3. Si contamos con un buen sistema... se estará contribuyendo al medio ambiente de trabajo.	Variables Independientes: Reducción de contaminación Ambiental. Minimizar riesgos de accidentabilidad. Reducción de costos por ventilación. Indicadores: Tiempos de reentrada (horas), Índice IPERC, kW consumidos.	Nivel y Diseño: Nivel exploratorio y descriptivo. Diseño de causa y efecto. Método científico empírico-analítico. Población y Muestra: 20 estaciones de muestreo en labores de producción y desarrollos de la zona NW-SE.

ANEXO 03: PARÁMETROS TOPOGRÁFICOS Y DE DISEÑO CAD - CIRCUITO ACTUAL

- **Identificación de Plano:** PLANO-VENT-001-ACTUAL (Vista Isométrica 3D).
- **Sistema de Coordenadas:** WGS 84 / UTM Zona 19S.
- **Cota Base (Fresh Air Intake):** Nivel 4500 Rampa Principal.
- **Vectores de Flujo Críticos (Zonas de recirculación ilustradas en color rojo):**
 - **Estación V-01 (Tope Galería 4420 NW):** Coordenadas N 8305420, E 185600. Sección transversal: 3.5m x 3.5m. Velocidad de flujo registrada: 12 m/min (Deficiente según D.S. 023-2017-EM). Caudal pasivo: 18,500 CFM.
 - **Estación V-02 (Tope Galería 4420 SE):** Coordenadas N 8305100, E 186100. Sección transversal: 3.5m x 3.5m. Velocidad de flujo registrada: 10 m/min. Caudal pasivo: 16,200 CFM.
- **Leyenda de Ventsim para el Plano:**
 - Rutas azules: Velocidad > 60 m/min (Flujo laminar de ingreso).
 - Rutas amarillas: Velocidad 20 - 40 m/min (Transición en rampas y subniveles).
 - Rutas naranjas/rojas: Velocidad < 20 m/min (Incumplimiento normativo, riesgo alto de gasamiento).

ANEXO 04: PARÁMETROS TOPOGRÁFICOS Y DE DISEÑO CAD - CIRCUITO PROPUESTO

- **Integración de Nueva Infraestructura (Eje Troncal):**
 - **Obra:** Chimenea de Extracción Raise Boring (RB).
 - **Collar (Top):** Nivel 4665 (Galería de Retorno Principal). Coord: N 8305250, E 185850, Z 4665.
 - **Base (Bottom):** Nivel 4420 (Crucero de conexión Veta Mirtha). Coord: N 8305250, E 185850, Z 4420.
 - **Azimut / Inclinación:** 0° / 90° (Totalmente vertical).
 - **Diámetro / Longitud:** 2.50 metros / 245.00 metros.
- **Reconfiguración de Flujos:**
 - **Estación V-01 Propuesta (Galería 4420 NW):** Inclusión de ventilador auxiliar impelente de 30 HP con manga lisa reforzada de 36". Velocidad proyectada en el plano (Ruta verde): 35 m/min.
 - **Estación de Extracción Principal:** Ubicada en Z 4665, con flujo direccional ascendente continuo.
- **Tapones (Bulkheads):** Cierre hermético de las chimeneas antiguas 430 y 450 en el nivel 4440 para evitar cortocircuitos de presión negativa, representados con bloqueos tipo "X" en el isométrico.

ANEXO 05: MEMORIA DE CÁLCULO DE REQUERIMIENTOS DE AIRE (Según D.S. N°023-2017-EM)

Cálculo de Demanda de Aire para el Nivel 4420 y Subniveles (Veta Mirtha) - Proyección

2025:

1. Caudal requerido por número de trabajadores (Q_{per}):

- Dotación máxima por turno: 45 personas.
- Factor normativo (Mina > 3000 msnm): 5 m³/min por persona.
- Cálculo: 45 personas * 5 m³/min = 225.00 m³/min (7,945 CFM).

2. Caudal requerido por equipos con motor petrolero (Q_{eq}):

- Equipos operativos simultáneos:
 - 03 Scooptrams R1300G (165 HP c/u) = 495 HP.
 - 02 Jumbos Boomer 282 (Motor tramming 100 HP c/u) = 200 HP.
 - 02 Volquetes Scania P410 (Derrateo subterráneo a 277 HP c/u) = 554 HP.
- Total HP mecánicos: 1,249 HP (Se redondea a 1,250 HP).
- Factor normativo: 3 m³/min por HP.
- Cálculo: 1,250 HP * 3 m³/min = 3,750.00 m³/min (132,431 CFM).

3. Caudal requerido por consumo de madera y explosivos:

- Madera: No aplica (Mina altamente mecanizada con sostenimiento de shotcrete y pernos).
- Explosivos (ANFO): Dilución cubierta por el caudal máximo calculado para equipos y factor de fugas.

4. Caudal requerido por temperatura:

- Temperatura efectiva actual: 15.2°C a 24.5°C.
- No requiere caudal extra por temperatura (Inferior a 29°C bulbo húmedo).

5. Factor de Fugas (Q_{fugas}):

- 15% sobre la suma de ($Q_{\text{per}} + Q_{\text{eq}}$).
- Cálculo: $0.15 * (225.00 + 3,750.00) = 596.25 \text{ m}^3/\text{min}$ (21,056 CFM).

CAUDAL TOTAL DE DISEÑO REQUERIDO (Q_{total}):

- $225.00 + 3,750.00 + 596.25 = \mathbf{4,571.25 \text{ m}^3/\text{min}}$
- Conversión a sistema imperial: $4,571.25 * 35.3147 = \mathbf{161,432 \text{ CFM}}$.



ANEXO 06: REPORTE DE LEVANTAMIENTO DE ESTACIONES DE VENTILACIÓN IN SITU

Cód. Estación	Labor Evaluada	Área de Sección (m²)	Velocidad Promedio (m/min)	Caudal Aforado (CFM)	Temp. Bulbo Seco (°C)	Temp. Bulbo Húmedo (°C)	Gas CO (ppm)	Observaciones de Campo
ST-01	Rampa Principal (Ingreso)	16.50	115.0	67,000	12.0	9.5	0.0	Flujo fresco constante.
ST-04	Crucero Principal 4420	12.25	28.0	12,100	15.5	13.0	5.0	Distribución deficiente hacia ramales.
ST-08	Galería 4420 NW (Frente)	12.25	12.0	5,182	24.5	22.1	18.0	Crítico: Velocidad < 20 m/min. Fuerte recirculación de polvo.
ST-12	Galería 4420 SE (Frente)	12.25	10.0	4,320	25.1	23.0	22.0	Crítico: Exposición a estrés térmico y acumulación de humos de escape.
ST-16	Subnivel 4440 (Tope)	9.00	14.0	4,444	23.8	21.5	15.0	Falta de ventilación auxiliar. Manga perforada a 50 m.

ANEXO 07: HOJAS DE DATOS (DATA SHEETS) DEL VENTILADOR PRINCIPAL PROPUESTO

Especificaciones Técnicas del Equipo de Extracción Principal:

- **Fabricante Sugerido:** Korfmann / Howden (O equivalente minero).
- **Tipo de Ventilador:** Axial de flujo inducido (Extractor de superficie/collar).
- **Diámetro del Rotor:** 2.0 metros (Acople mediante transición cónica a la chimenea de 2.5 m).
- **Motor Eléctrico:** Trifásico, 440 V / 60 Hz, protección IP66 (Heavy Duty).
- **Potencia Nominal:** 250 HP (186 kW).
- **Rendimiento Operativo (Punto de Diseño):**
 - Caudal: 165,000 CFM (4,672 m³/min).
 - Presión Estática: 95 mmca (932 Pa).
 - Eficiencia Mecánica Máxima: 78% (con aspas ajustadas a 18°).
- **Sistema de Control:** Variador de Frecuencia (VFD) integrado para modulación de velocidad (Ventilation on Demand).
- **Accesorios Incluidos:** Silenciadores cilíndricos (Reducción de ruido < 85 dB a 3 m), campana de succión con malla guardavías, difusor de descarga con cono interior para recuperación de presión dinámica.

ANEXO 08: REPORTE DE SIMULACIÓN TERMODINÁMICA EN SOFTWARE VENTSIM™

ID Rama (Ventsim)	Descripción del Tramo	Resistencia (Ns²/m⁸)	Caudal (CFM)	Caída de Presión Estática (Pa)	Potencia de Fricción (kW)	Flujo de Contaminante (Simulación CO)
Br-045	Ingreso Nv. 4500	0.00045	165,000	125	15.2	0 ppm
Br-089	Distribución Crucero	0.00112	160,000	45	6.8	0 ppm
Br-112	Galería NW (Activa)	0.00850	85,000	180	12.5	4 ppm (Barrido eficiente)
Br-115	Galería SE (Activa)	0.00910	75,000	210	14.1	5 ppm (Barrido eficiente)
Br-200	Chimenea RB 2.5 m	0.00015	160,000	310	23.5	Extracción de masa total (15 ppm combinados)
Br-201	Descarga Superficie	0.00005	160,000	62	4.6	Dispersión ambiental

ANEXO 09: ANÁLISIS GEOMECÁNICO LONGITUDINAL DE LA CHIMENEA RAISE BORING

Tramo Vertical (Elevación Z)	Litología Principal	RQD (%)	RMR (Bieniawski)	Clasificación del Macizo	Recomendación Geomecánica / Perforabilidad
4665 a 4550 msnm (Primeros 115 m)	Andesita porfirítica levemente alterada.	65 - 75%	62 (Clase II)	Roca Buena	Autosoportable. Velocidad de penetración del escariador (ROP): 0.50 m/h. No requiere sostenimiento post-excavación.
4550 a 4480 msnm (Intermedio 70 m)	Brecha hidrotermal con venillas de cuarzo.	45 - 55%	48 (Clase III)	Roca Regular	Riesgo leve de descamamiento (Sloughing) por fricción del aire. ROP: 0.65 m/h. Inspección con cámara post-perforación para evaluar baches.
4480 a 4420 msnm (Base 60 m)	Andesita silicificada (Halo de la veta Mirtha).	75 - 85%	71 (Clase II)	Roca Buena	Altamente competente. Paredes lisas ideales para reducción de turbulencia aerodinámica. ROP: 0.40 m/h.

ANEXO 10: EVALUACIÓN ECONÓMICA (FLUJO DE CAJA DEL PROYECTO DE VENTILACIÓN)

Horizonte de evaluación: 5 años (Vida remanente de los frentes de estudio).

Tasa de descuento (WACC proyectado): 12%.

1. Presupuesto de Inversión (CAPEX):

- Obra Civil: Perforación Raise Boring Ø 2.5 m x 245 m = \$686,000.00 USD.
- Equipamiento: Ventilador 250 HP + VFD + Tableros + Cables = \$145,000.00 USD.
- Total CAPEX = **\$831,000.00 USD.**

2. Ahorros Operativos Anuales (Ingresos Proyectados):

- Reducción del tiempo de evacuación de 2.5 h a 0.85 h = Ganancia de 1.65 h/turno.
- 1.65 h x 2 turnos x 330 días = 1,089 horas de avance recuperadas al año.
- Valorización del tiempo de equipo pesado y personal = \$480,000.00 USD/año.
- Diferencial de OPEX eléctrico (Mayor caudal, pero eficiencia mejorada) = - \$14,700.00 USD/año.
- Flujo Neto Operativo (Ahorro neto) = **\$465,300.00 USD/año.**

3. Indicadores de Rentabilidad Financiera:

- **VAN (Valor Actual Neto al 12%): \$845,958.00 USD.** (Proyecto económicamente viable y generador de valor).
- **TIR (Tasa Interna de Retorno): 47.5%.** (Muy superior al costo de oportunidad del capital).
- **Payback (Periodo de Recuperación): 1.78 años (21 meses).**

Tabla 10

Flujo de Caja Económico Proyectado (En USD)

Concepto	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Inversión (CAPEX)						
Perforación Raise Boring	(686,000)					
Ventilador 250 HP + VFD	(145,000)					
Total Inversión	(831,000)					
Ingresos / Ahorros (OPEX)						
Ahorro por tiempo muerto recuperado		480,000	480,000	480,000	480,000	480,000
Diferencial Costo Energía		(14,700)	(14,700)	(14,700)	(14,700)	(14,700)
Flujo Neto Operativo		465,300	465,300	465,300	465,300	465,300
Flujo de Caja Neto	(831,000)	465,300	465,300	465,300	465,300	465,300

Indicadores de Rentabilidad:

- **Tasa de Descuento (WACC):** 12%
- **VAN (Valor Actual Neto):** \$ 845,958.00 USD
- **TIR (Tasa Interna de Retorno):** 47.5%
- **Payback (Periodo de recuperación):** 1.78 años

Fuente: Elaboración propia en base a cotizaciones técnicas y parámetros operativos, 2025.