



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

**Optimización del diseño del sistema de ventilación para
incrementar la productividad de los trabajadores en el
nivel 460 de la cortada Esperanza en el año 2023**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas

AUTOR

Bryan Jesus GUARDIA ESCOBEDO

ASESOR

Mg. Hugo SOLIS SARMIENTO

Lima, Perú

2025



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Guardia, B. (2025). *Optimización del diseño del sistema de ventilación para incrementar la productividad de los trabajadores en el nivel 460 de la cortada Esperanza en el año 2023*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería de Minas]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Bryan Jesus Guardia Escobedo
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	75201135
URL de ORCID	https://orcid.org/0009-0002-5962-0995
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Hugo Solis Sarmiento
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	09671245
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-7650-5916
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Alejandro Mena Ayala
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	10451517
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Mariano Pacheco Ortiz
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06284228
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Victor Hugo Ramirez Ponce
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06163701

Datos de investigación	
Línea de investigación	C.0.3.22 Ingeniería de software
Grupo de investigación	No aplica
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: Lima (Cercado de Lima) Latitud: -12.0582 Longitud: -77.0803
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2023 – 2024
URL de disciplinas OCDE	Minería, Procesamiento de minerales https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.05



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO DE MINAS

En el Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, el lunes 31 de marzo de 2025, siendo las 16:00 horas en presencia de los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado Calificador:

Dr. ALEJANDRO MENA AYALA	Presidente
Mg. MARIANO PACHECO ORTIZ	Miembro
Ing. VICTOR HUGO RAMIREZ PONCE	Miembro

Reunidos para el Acto Académico Público de la Sustentación de la Tesis titulada: «*Optimización del diseño del sistema de ventilación para incrementar la productividad de los trabajadores en el nivel 460 de la cortada Esperanza en el año 2023*», presentada por Don: **GUARDIA ESCOBEDO, BRYAN JESUS**, Bachiller en Ingeniería de Minas, para la obtención del Título Profesional de Ingeniero de Minas. Asesorado por el Mg. **HUGO SOLIS SARMIENTO**.

Los miembros del Jurado Calificador, escuchada la sustentación respectiva, plantearon al graduando las observaciones pertinentes, que fueron absueltas a:

..... *Satisfacción*

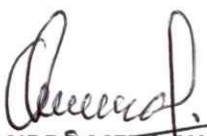
Concluida la Sustentación de Tesis, el Jurado procedió a evaluar y calificar según el reglamento vigente, cuyo resultado fue la nota de:

..... *16 (Aprobado con mención honoraria)*

Habiendo sido aprobada la Sustentación de la Tesis por el Jurado Calificador, el Presidente del Jurado recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, otorgue el **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO DE MINAS** a Don: **GUARDIA ESCOBEDO, BRYAN JESUS**.

Siendo las horas, se dio por concluido el acto académico, expidiéndose (6) Actas Originales de la Sustentación de Tesis.

Lima, 31 de marzo de 2025


Dr. ALEJANDRO MENA AYALA
PRESIDENTE


Mg. MARIANO PACHECO ORTIZ
MIEMBRO


Ing. VICTOR HUGO RAMIREZ PONCE
MIEMBRO


Mg. HUGO SOLIS SARMIENTO
ASESOR DE TESIS



CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo **HUGO SOLIS SARMIENTO** en mi condición de Asesor acreditado con la Resolución Decanal N° 000230-2025-D-FIGMMG/UNMSM de la tesis cuyo título es “*Optimización del diseño del sistema de ventilación para incrementar la productividad de los trabajadores en el nivel 460 de la cortada Esperanza en el año 2023*”, presentada por el bachiller **GUARDIA ESCOBEDO, BRYAN JESUS**, para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas, **CERTIFICO** que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante el software de similitud textual, el documento evaluado cuenta con el porcentaje de **14%** de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título.

Firma del Asesor

DNI: 09671245

Nombres y apellidos del Asesor: Mg. Hugo Solis Sarmiento



DEDICATORIA

A mi madre, Doña Petronila Escobedo Gutiérrez por su apoyo constante en todo mi proceso personal y formativo.

A mi padre, Don Eduardo Guardia Vega por sus consejos de vida.

A mis hermanos, por siempre estar cuando lo necesitamos.

A mis sobrinas, por ser fuente de alegría.

AGRADECIMIENTOS

A mi asesor el Magister Hugo Solís Sarmiento por su dedicación y perseverancia en el logro de objetivos.

A mis compañeros del grupo de estudio GEMVENT UNMSM por difundir conocimientos de ventilación.

Al Ing. Cristian Valencia por su enseñanza constante y predisposición.

RESUMEN

Un diseño del sistema de ventilación subterránea deficiente puede afectar negativamente el rendimiento y la toma de decisiones de los trabajadores, lo que resalta la importancia de proporcionar condiciones adecuadas para mejorar la productividad. En las unidades mineras, es esencial garantizar un entorno de trabajo que promueva la eficiencia y el bienestar de los empleados sin comprometer su salud. A nivel global, los accidentes por asfixia en la minería, causados por la acumulación de gases tóxicos y la falta de ventilación adecuada, representan un riesgo significativo, afectando negativamente la salud de los mineros y la sostenibilidad del sector.

El objetivo general de esta tesis es Optimizar el sistema de ventilación para el incremento de la productividad de los trabajadores en el nivel 460 de la Cortada Esperanza en el año 2023. Los objetivos específicos son diagnosticar las condiciones ambientales que afectan la productividad, determinar los requerimientos de aire fresco para mejorar el desempeño del personal y determinar los cambios que permitirán optimizar el diseño del sistema de ventilación.

La unidad minera estudiada presenta deficiencias en la cobertura de aire fresco y problemas de evacuación de aire viciado debido al avance de los frentes, incluido el Nivel 460. Para abordar esto, se han propuesto una serie de proyectos que satisfarán la necesidad actual de aire con una cobertura del 132.5%, proporcionando condiciones favorables para una posible expansión. Las mejoras incluyen la construcción de chimeneas Raise Borer para la entrada y evacuación de aire viciado, la implementación de un ventilador auxiliar inyector de 40,000 cfm, un ventilador principal extractor de 95,000 cfm, un ventilador extractor de 100,000 cfm para los frentes, así como el aumento de la capacidad de los ventiladores auxiliares que suministran aire fresco a los frentes de avance.

Se espera que la optimización del diseño del sistema de ventilación mejore la salud y seguridad de los trabajadores, además de reducir los tiempos operativos al aumentar la eficiencia de los procesos, incrementando la producción de toneladas por hombre guardia de 2.30 a 2.69.

Estos hallazgos subrayan la importancia de la ventilación en la minería y su impacto en el bienestar y la eficiencia de los empleados.

ABSTRACT

A poorly designed underground ventilation system can negatively affect the performance and decision-making of workers, highlighting the importance of providing adequate conditions to enhance productivity. In mining units, it is essential to ensure a work environment that promotes efficiency and employee well-being without compromising their health. Globally, asphyxiation accidents in mining, caused by the accumulation of toxic gases and lack of proper ventilation, pose a significant risk, adversely impacting miners' health and the sustainability of the sector.

The general objective of this thesis is to optimize the ventilation system to increase worker productivity at Level 460 of the Cortada Esperanza in 2023. The specific objectives are to diagnose the environmental conditions affecting productivity, determine the requirements for fresh air to improve personnel performance, and identify the changes necessary to optimize the ventilation system design.

The studied mining unit shows deficiencies in fresh air coverage and issues with the evacuation of contaminated air due to the advancement of the faces, including Level 460. To address this, a series of projects have been proposed to meet the current air needs with a coverage of 132.5%, providing favorable conditions for potential expansion. The improvements include the construction of Raise Borer shafts for the intake and evacuation of contaminated air, the implementation of a 40,000 cfm auxiliary inlet fan, a 95,000 cfm main exhaust fan, and a 100,000 cfm exhaust fan for the faces, as well as increasing the capacity of the auxiliary fans supplying fresh air to the advancing faces.

It is expected that optimizing the design of the ventilation system will improve the health and safety of workers while reducing operational times by increasing process efficiency, raising production from 2.30 to 2.69 tons per worker shift.

These findings underscore the importance of ventilation in mining and its impact on employee well-being and efficiency.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.2.1 Descripción de la problemática	2
1.2.1 Formulación del problema	5
1.2.1.1. Problema general	5
1.2.1.2. Problemas específicos.....	5
1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	6
1.3.1 Objetivo general	6
1.3.2 Objetivos específicos.....	6
1.4. IMPORTANCIA Y ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN	6
1.5. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	6
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO	8
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	8
2.2. BASES TEÓRICAS	13
2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS	45
CAPITULO III: HIPÓTESIS Y VARIABLES	49
4.1. HIPÓTESIS	49
4.2. VARIABLES	49
3.2.1 Variables independientes.....	49
3.2.2 Variables dependientes.....	49
4.3. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	49
CAPITULO IV: MATERIALES Y MÉTODOS	51

5.1.	ÁREA DE ESTUDIO	51
5.2.	DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	51
5.3.	POBLACIÓN Y MUESTRA	51
5.4.	PROCEDIMIENTO, TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	52
5.5.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	54
CAPITULO V: RESULTADOS.....		56
CAPITULO VI: DISCUSIÓN E INTERPRETACIÓN.....		107
CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		110
CAPÍTULO VIII: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		112
ANEXOS		114

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Cantidad de accidentes producidos por gaseamiento en minería subterránea en Perú.....	4
Figura 2 Diagrama de ishikawa para identificar problemas de ventilación	5
Figura 3 Material particulado en minería	17
Figura 4 Ventilación mecánica subterránea en minería.....	19
Figura 5 Ventilación soplante.....	20
Figura 6 Ventilación aspirante.....	20
Figura 7 Ventilación mixta con dos conducciones	21
Figura 8 Ventiladores centrífugos o radiales	22
Figura 9 Ventiladores axiales	23
Figura 10 Ventiladores de hélice	24
Figura 11 Curva característica del ventilador.....	24
Figura 12 Acoplamiento en serie.....	26
Figura 13 Acoplamiento en paralelo	26
Figura 14 Circuito en serie	29
Figura 15 Circuito en paralelo	30
Figura 16 Descripción de ingresos y salidas de aire del sistema de ventilación actual..	58
Figura 17 Ubicación de puntos de monitoreo (pm) en el sistema de ventilación actual	60
Figura 18 Medición de concentración de CO (ppm) PM1	61
Figura 19 Medición de concentración de no (ppm) PM1	62
Figura 20 Medición de concentración de no ₂ (ppm) PM1.....	62
Figura 21 Medición de concentración de co (ppm) PM2	63
Figura 22 Medición de concentración de no (ppm) PM2.....	64
Figura 23 Medición de concentración de no ₂ (ppm) PM2.....	64

Figura 24 Medición de concentración de co (ppm) PM3	65
Figura 25 Medición de concentración de no (ppm) PM3	66
Figura 26 Medición de concentración de no ₂ (ppm) PM3.....	66
Figura 27 Simulación dinámica de contaminantes – sistema de ventilación actual.....	68
Figura 28 Acceso a los frentes de trabajo nivel 460.....	69
Figura 29 Medición de concentración de co (ppm) PM4	70
Figura 30 Medición de concentración de no (ppm) PM4.....	70
Figura 31 Medición de concentración de no ₂ (ppm) PM4.....	71
Figura 32 Balance de caudal de aire actual	82
Figura 33 Sección típica scoop LH 307 - Sandvik	84
Figura 34 Sección típica jumbo Boomer 104 – Atlas Copco	85
Figura 35 Sección típica volquete TH 315 – Sandvik.....	86
Figura 36 Zona proyectada de avance y/o expansión.....	88
Figura 37 Ingreso de aire fresco chimenea RB-380	89
Figura 38 Salida de aire viciado chimenea RB-400	90
Figura 39 Aumento de capacidad de ventilador inyector nivel 520	91
Figura 40 Aumento de capacidad de ventilador inyector nivel 460	92
Figura 41 Salida de aire viciado de frentes de minado chimenea RB-480.....	93
Figura 42 Caudal de aire en el frente del nivel 460 – sistema de ventilación optimizado	96
Figura 43 Simulación dinámica de contaminantes – sistema de ventilación optimizado	98
Figura 44 Medición de contaminantes en punto de monitoreo (PM5).....	99
Figura 45 Medición de concentración de co (ppm) PM5	100
Figura 46 Medición de concentración de no (ppm) PM5.....	100

Figura 47 Medición de concentración de NO_2 (ppm) PM5.....	101
---	-----

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Cuadro estadístico de víctimas mortales por gaseamiento en minería subterránea.....	3
Tabla 2 Límites Máximos Permisibles de los gases más frecuentes en las minas peruanas.....	16
Tabla 3 Tabla de valores del factor “k”	31
Tabla 4 Factor de producción según consumo de madera.....	34
Tabla 5 Velocidad mínima por temperatura	35
Tabla 6 Reacciones del cuerpo ante la exposición al monóxido de carbono	43
Tabla 7 Reacciones del cuerpo ante la exposición al dióxido de nitrógeno (ppm)	44
Tabla 8 Operacionalización de variables.....	50
Tabla 9 Descripción de los puntos de medición de entrada de aire en la unidad minera de estudio.....	56
Tabla 10 Descripción de los puntos de medición de salida de aire en la unidad minera de estudio.....	57
Tabla 11 Resumen de datos obtenidos en campo - ingresos de aire mina	59
Tabla 12 Resumen de datos obtenidos en campo - salidas de aire mina.....	59
Tabla 13 Entrada de condiciones operativas en software Ventsim	73
Tabla 14 Correlación entrada de aire modelo Ventsim de acuerdo al modelo de campo	74
Tabla 15 Correlación salida de aire modelo Ventsim de acuerdo al modelo de campo	75
Tabla 16 Factor de fricción en labores de desarrollo y preparación.....	76

Tabla 17	Cálculo de caudal de aire por personal de toda la unidad minera	77
Tabla 18	Cálculo de caudal de aire por equipos petroleros de toda la unidad minera ..	79
Tabla 19	Cálculo de caudal de aire por fugas de toda la unidad minera	80
Tabla 20	Cálculo de caudal de aire de toda la unidad minera	81
Tabla 21	Balance actual mina.....	81
Tabla 22	Cálculo de caudal de aire por personal del nivel 460.....	83
Tabla 23	Cálculo de caudal de aire por scoop LH 307 - Sandvik	83
Tabla 24	Cálculo de caudal de aire por Boomer 104 – Atlas copco	84
Tabla 25	Caudal de aire por haul trucks TH 315 – Sandvik.....	85
Tabla 26	Caudal aire por fugas nivel 460.....	87
Tabla 27	Caudal aire requerido nivel 460	87
Tabla 28	Resumen de resultados del sistema de ventilación optimizado.....	94
Tabla 29	Resumen de la producción del personal con el sistema de ventilación actual vs sistema de ventilación optimizado.....	105

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

El presente estudio tiene como objetivo optimizar el sistema de ventilación de una mina ubicada en Ancash. El propósito es mantener un ambiente laboral adecuado que satisfaga los requerimientos de aire fresco del personal y permita realizar eficientemente el proceso de extracción de minerales. Esto contribuirá a elevar la productividad de los trabajadores en las labores de influencia.

A medida que las minas subterráneas se profundizan horizontal y verticalmente, ventilar las zonas de trabajo se vuelve más complejo. En el caso de estudio, el sistema de ventilación actual no es suficiente para proporcionar condiciones apropiadas, lo que resulta en un incremento de la temperatura, escasez de aire y una inadecuada disipación de los gases resultantes de las voladuras. Para abordar estos problemas, esta investigación destaca la importancia de optimizar el sistema de ventilación, asegurando un suministro suficiente de aire fresco que genere condiciones favorables y, consecuentemente, aumente la productividad de los trabajadores.

La simulación de los circuitos de ventilación se realizará cumpliendo las normas vigentes, como el DS 024-2016-EM y su modificatoria DS 023-2017-EM, así como el DS 074-2001 PCM, que establecen los estándares nacionales de calidad del aire.

Este estudio emplea una metodología aplicada con un diseño descriptivo no experimental. Se basa en la revisión de documentos y la observación de datos existentes para identificar las deficiencias actuales del sistema de ventilación del nivel 460 de la Cortada Esperanza. Utilizando el programa de simulación Ventsim, se modelarán los cambios en el diseño del sistema de ventilación para evaluar su impacto potencial en las condiciones laborales y la productividad. Este enfoque permite diagnosticar las condiciones laborales, determinar el requerimiento de aire fresco y la evaluación de las mejoras, proporcionando

una solución práctica.

Se evaluarán diversos factores, como la temperatura, la calidad y el caudal del aire. Esta evaluación permitirá mejorar la ventilación mediante la implementación de infraestructura y equipos adecuados que aseguren un suministro eficiente de aire fresco en todas las labores. No implementar estas mejoras podría mantener condiciones inseguras de trabajo, perjudicando la salud de los trabajadores y afectando negativamente los resultados operativos.

1.2. Planteamiento del problema

1.2.1 Descripción de la problemática

Las unidades mineras subterráneas enfrentan diversas necesidades, siendo fundamental el cuidado y bienestar de los empleados. Es crucial asegurar que la calidad del ambiente de trabajo favorezca el desarrollo de las actividades mineras, permitiendo a los colaboradores producir de manera eficiente sin comprometer su salud.

A nivel mundial, la minería se ve afectada por numerosos accidentes de asfixia. Diversos informes y estudios han analizado esta problemática, proporcionando una visión global sobre los riesgos y las medidas necesarias para prevenirlos. Según un reporte de la Organización Internacional del Trabajo (OIT, 2017) sobre la seguridad en minería, los accidentes por asfixia pueden ser ocasionados por una variedad de factores, como la acumulación de gases tóxicos, la falta de ventilación adecuada y condiciones ambientales adversas. Estos accidentes representan una amenaza significativa para el bienestar y la salud de los mineros, además de impactar negativamente en la productividad y sostenibilidad del sector minero.

En el Perú, el Ministerio de Energía y Minas (MINEM, 2023) en sus informes regulares publicadas a través de su página web comparte los reportes estadísticos de accidentes en minería, así como el número de víctimas mortales producto de la materialización de los

accidentes. Se ha recopilado la información desde el año 2006 hasta el 31 de diciembre del 2023. En la Tabla 1 y Figura 1, se muestra el número de víctimas mortales producidas por accidentes relacionados a gaseamiento en labores mineras subterráneas.

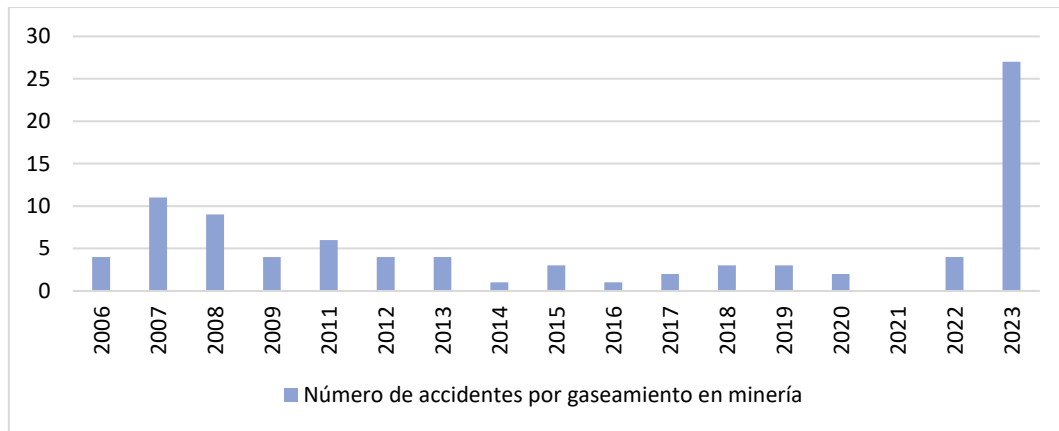
Tabla 1

Cuadro estadístico de víctimas mortales por gaseamiento en minería subterránea

Año	Accidentes por gaseamiento en minería subterránea
2006	4
2007	11
2008	9
2009	4
2011	6
2012	4
2013	4
2014	1
2015	3
2016	1
2017	2
2018	3
2019	3
2020	2
2021	0
2022	4
2023	27

Figura 1

Cantidad de accidentes producidos por gaseamiento en minería subterránea en Perú



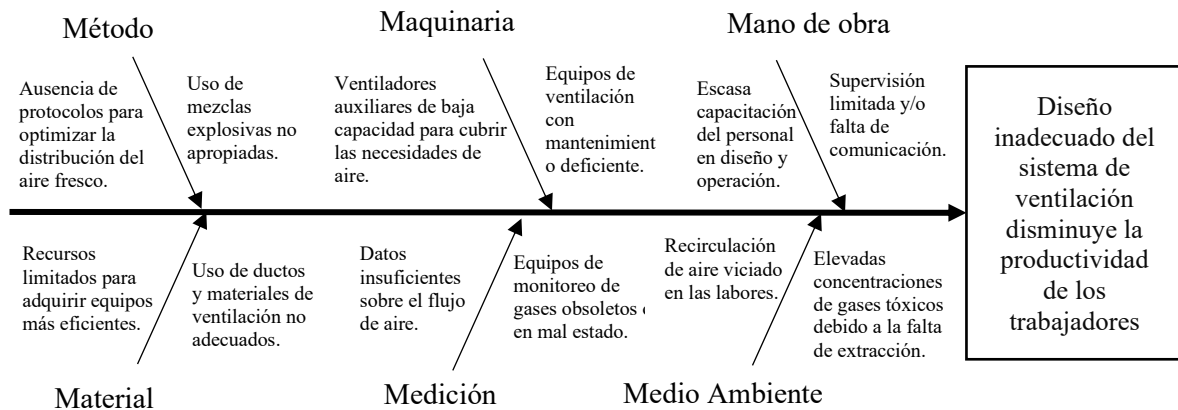
Según los reportes estadísticos, se resalta la importancia de que las operaciones mineras cuenten con sistemas de ventilación adecuados en los diversos ambientes de trabajo para disminuir consistentemente los accidentes y número de víctimas mortales por gaseamiento. Además, se muestra que en el año 2023 hubo 27 víctimas debido al incendio producido en la Unidad Minera Yanaquihua S.A.C.

Por otro lado, en la mina objeto de este estudio se hallaron importantes oportunidades de mejora tales como recirculación de aire viciado, insuficiente cantidad de aire fresco y una calidad de aire con presencia de gases por encima de los límites máximos permisibles.

Asimismo, para realizar un análisis respecto a los problemas presentes en la ventilación se ha elaborado un Diagrama de Ishikawa, que se muestra en la Figura 2.

Figura 2

Diagrama de Ishikawa para identificar problemas de ventilación



Lo mostrado anteriormente representa una situación de preocupación para el sector. Para corregir la situación descrita, el propósito de esta investigación es demostrar cómo la optimización del sistema de ventilación en una mina puede contribuir a evitar este tipo de incidentes y por consecuencia víctimas mortales; así como también contribuir al incremento de la productividad de los trabajadores.

1.2.1 Formulación del problema

1.2.1.1. Problema general

¿Cómo un óptimo diseño del sistema de ventilación incrementará la productividad de los trabajadores en el nivel 460 de la Cortada Esperanza, 2023?

1.2.1.2. Problemas específicos

- ¿Cuáles son las condiciones del ambiente laboral que afectan el incremento de la productividad de los trabajadores en el nivel 460 de la Cortada Esperanza, 2023?
- ¿Cuál es el requerimiento de aire fresco que permite el incremento de la productividad de los trabajadores en el nivel 460 de la Cortada Esperanza, 2023?
- ¿Cuáles serán los cambios en el diseño del sistema de ventilación que incrementará la productividad de los trabajadores en el nivel 460 de la Cortada Esperanza, 2023?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo general

Optimizar el sistema de ventilación para el incremento de la productividad de los trabajadores en el nivel 460 de la Cortada Esperanza, 2023.

1.3.2 Objetivos específicos

- Diagnosticar las condiciones del ambiente laboral que afectan el incremento de la productividad de los trabajadores en el nivel 460 de la Cortada Esperanza, 2023.
- Determinar el requerimiento de aire fresco que permita el incremento de la productividad de los trabajadores en el nivel 460 de la Cortada Esperanza, 2023.
- Determinar los cambios en el diseño del sistema de ventilación que incrementará la productividad de los trabajadores en el nivel 460 de la Cortada Esperanza, 2023.

1.4. Importancia y alcance de la investigación

De no realizarse esta investigación, no sería posible el incremento de la productividad del personal ni mejorar las condiciones de trabajo en la explotación de la cortada Esperanza. La actual problemática de ventilación, evidenciada por la presencia de gases nocivos y el tiempo prolongado de su dispersión post-voladura, pone en riesgo la salud de los trabajadores. Mejorar el sistema de ventilación contribuirá a un ambiente de trabajo más seguro y eficiente, alineado con los objetivos del programa de avances.

A través de la optimización del sistema de ventilación utilizando el software VentSim, se pretende asegurar condiciones laborales seguras que protejan la salud de los trabajadores en la unidad minera y, a su vez, incrementar la productividad en el nivel 460 de la cortada Esperanza.

1.5. Limitaciones de la investigación

La optimización del sistema de ventilación se centrará en el nivel 460 de la Cortada Esperanza de la unidad minera ubicada en Ancash, utilizando el software Ventsim

Design. Se realizarán simulaciones para evaluar los cambios en el diseño y su impacto en la productividad. Sin embargo, el estudio está limitado a la disponibilidad de datos existentes y las restricciones del software utilizado.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

Antecedentes internacionales

Oniyide (2022) llevó a cabo una investigación con el objetivo de determinar del tiempo de reingreso a las áreas subterráneas afectadas por gases de voladura y su relevancia para la seguridad y productividad de las minas. Se empleó una metodología exploratoria con un enfoque cuantitativo. La muestra abarcó las labores en una zona específica de la mina subterránea, y los datos técnicos recolectados permitieron la simulación de diversas condiciones con el software VentSim. Los resultados obtenidos de las simulaciones con VentSim han evidenciado que, en comparación con los tiempos estimados manualmente por los trabajadores, el uso del software proporciona una predicción más precisa y confiable del tiempo de reingreso como se muestra en el estudio en el cual se determinó que el tiempo de reingreso calculado utilizando VentSim fue de 26 minutos, significativamente menor que los 60-90 minutos estimados por los trabajadores. La investigación concluyó que el modelamiento en el software no solo mejora la seguridad al garantizar que los niveles de gases sean seguros antes del reingreso, sino que también optimiza la productividad al reducir los tiempos de espera innecesarios.

Maleki et al. (2018) llevaron a cabo un estudio con el objetivo de incrementar la productividad del proceso reduciendo los costos generales y determinando la ubicación óptima para ventiladores y reguladores en una mina. La metodología utilizada fue cuantitativa con un enfoque explicativo-experimental. La muestra seleccionada para el estudio abarcó áreas específicas donde se necesitaban ventiladores y reguladores dentro de la unidad minera. Los datos técnicos recopilados se emplearon para diseñar el sistema de ventilación en el programa VentSim, y posteriormente, toda la información obtenida

fue procesada. Los resultados mostraron una reducción significativa del costo total de ventilación, que disminuyó de \$468,153.28 a \$431,277.40, generando ahorros de \$36,875.88 anualmente; los cuales consistieron en la colocación de cuatro ventiladores principales en ubicaciones óptimas que protegen a los trabajadores de gases peligrosos y tóxicos. La conclusión fue que la utilización del software Ventsim y la programación matemática permitió optimizar la ventilación de la mina, reduciendo los costos operativos y mejorando la seguridad laboral, esto implica que una inversión inicial en tecnología y simulación puede tener beneficios económicos y de seguridad a largo plazo.

Villalba (2017) en su estudio tuvo como objetivo analizar y evaluar el estado actual del sistema de ventilación, comparando los puntos de aforo medidos con la normativa vigente y los cálculos técnicos realizados en la mina Bonanza, operada por Exportadora Aurífera S.A. EXPAUSA. La metodología utilizada fue descriptiva y cuantitativa, abarcando todo el circuito de ventilación de la mina. La información técnica se recopiló a partir de publicaciones y mediciones de campo, y se procesó utilizando Word, Excel, Autocad y Arcgis. Los resultados indican que en los puntos de trabajo el personal está expuesto a valores de CO que varían entre 5 y 10 ppm, además en el nivel principal de la mina se detectó una baja velocidad de flujo del aire en el sector de la falla Ratones (entre Veta 8 y Veta D) y entre la Veta 14 y Q, donde se observó la presencia de gas (CO) y polvo en suspensión ($>10\mu$) durante la primera hora de trabajo del turno. La conclusión fue que el sistema de ventilación de la Mina Bonanza presenta varias deficiencias que deben ser abordadas para mejorar la calidad del aire y la seguridad del personal y que la optimización del sistema de ventilación no solo asegurarán condiciones de trabajo más seguras, sino que también aumentarán la eficiencia operativa en los sectores más críticos de la mina.

Carabajo (2015) en su estudio tuvo como objetivo diseñar un circuito de ventilación que fuera tanto adecuado como eficiente para la zona norte de Mina Cabo de Hornos de la Empresa Minera ELIPE S.A. La investigación es de carácter descriptivo y transversal. Esta propuesta buscaba solucionar problemas ambientales en la mina subterránea y aumentar la producción de la unidad minera, con un enfoque prospectivo. La muestra del estudio comprendía los circuitos que cubren diferentes niveles de la zona norte, con las cotas correspondientes asignadas. La recopilación de datos se llevó a cabo en toda la unidad minera, utilizando técnicas e instrumentos específicos tales como mediciones en campo, simulaciones en el Ventsim y herramientas de análisis financiero. Los resultados mostraron que el sistema de ventilación registra un déficit del 75% del caudal de ingreso necesario, aumentando a medida que avanzan los trabajos de desarrollo minero y la concentración de gases incrementa en los sectores más profundos de la mina, afectando el desempeño eficiente de los trabajadores y deteriorando las condiciones laborales. Se concluyó que mediante la implementación de nuevos equipos y el franqueo de chimeneas de ventilación; así como prolongar la North Shaft Alimak para inyectar aire limpio a los niveles más bajos se optimizará el sistema de ventilación de la unidad minera.

Antecedentes nacionales

Tejeda y Mucha (2022) llevaron a cabo un estudio cuyo objetivo fue renovar el sistema de ventilación integrado de la unidad minera y evaluar los resultados de las condiciones de ventilación. La mina Cachi Cachi, perteneciente a la unidad minera Yauricocha, fue seleccionada como muestra. La metodología de investigación fue científica y aplicada, con un enfoque correlacional y un diseño experimental. Se utilizaron fichas de observación, entrevistas personalizadas y encuestas como instrumentos. Los resultados mostraron que la zona de Cachi Cachi cuenta con vías de suministro de aire fresco, siendo el túnel Yauricocha el que tiene mayor impacto en el ingreso de flujo fresco hacia el CX

3470NE. El sistema de ventilación de la Mina Yauricocha opera mediante un circuito integrado que emplea sistemas convencionales o mecanizados, con rampas de entrada, chimeneas de ventilación y chimeneas escalonadas para la descarga de aire viciado. Se concluyó que el sistema presenta alta resistencia y que, en ciertos momentos de la operación, los niveles de gases perjudiciales superaban los Límites Máximos Permitidos (LMP).

Vargas (2020) realizó un estudio cuyo objetivo fue identificar una propuesta técnica y económica para optimizar el sistema de ventilación de la operación minera subterránea Cobriza. La investigación empleó una metodología de tipo aplicativa con un enfoque descriptivo. Se realizó un muestreo representativo de la población, midiendo la calidad del aire en la Rampa 4800, incluyendo los niveles de -130, -200 y 1800. Para la recopilación de datos se utilizaron detectores de gases y formularios de observación.

Los resultados indicaron que la implementación del diseño propuesto, que sugiere la reducción de 12 a 9 ventiladores en el sistema secundario, disminuirá los costos de mantenimiento y energía eléctrica. Los balances de calidad de aire mostraron un ingreso de 1'118,818.42 cfm y una salida de aire viciado de 1'169,850.02 cfm, alcanzando una cobertura de cantidad de aire del 100.78%. Esta mejora contribuirá a un mejor ambiente laboral. En conclusión, la propuesta técnica y económica generará mejoras en las condiciones ambientales de trabajo y reducirá los costos operativos.

Escobar y Rodas (2020) llevaron a cabo un estudio con el objetivo de optimizar el sistema de ventilación de la mina subterránea artesanal de Algamarca, buscando garantizar una calidad y control de aire. Se utilizó una metodología básica con un diseño transversal descriptivo no experimental. La muestra del estudio incluyó a los empleados del nivel 2

de la mina subterránea de Algamarca. Para la recolección de datos se emplearon una guía de análisis de documentos, una guía de observación y encuestas. Los resultados indicaron que el sistema de ventilación existente presenta oportunidades de mejora, lo cual impacta negativamente en las condiciones laborales, no garantizando un entorno de trabajo seguro y saludable. Se concluyó que la implementación de un sistema de ventilación secundaria, utilizando ductos y ventiladores auxiliares, mejorará significativamente el ambiente de trabajo, cumpliendo con la normativa minera vigente.

Guevara (2019) llevó a cabo un estudio con el objetivo de desarrollar un sistema de ventilación para mejorar la productividad. La metodología fue descriptiva, utilizando métodos analíticos y sistemáticos para la recolección de información, documentación y técnicas de trabajo de campo. La muestra incluyó todas las labores del proyecto Cuchi Corral. Los instrumentos empleados fueron anemómetros digitales, Altair x, brújulas, GPS, cintas métricas, entre otros, y se utilizó el software Ventsim para modelar los circuitos de ventilación. Los resultados indicaron que la unidad minera requiere un total de 4,838.1 cfm para garantizar condiciones apropiadas para los trabajadores. Para ello, se propuso la adquisición de un ventilador marca FLECOM con un caudal de 4,000 a 10,000 cfm y un diámetro de manga de 320 mm. Se concluyó que las condiciones actuales del ambiente de trabajo no cumplen con el Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería DS 024-216-EM. Sin embargo, con la implementación de la propuesta de mejora, se podrían ofrecer condiciones adecuadas de trabajo, cumpliendo con la normativa peruana.

Llano (2017) llevó a cabo un estudio con el objetivo de optimizar el sistema de ventilación de la mina Santa Filomena para asegurar un flujo adecuado de aire fresco y la expulsión

eficiente del aire viciado. La metodología empleada fue de tipo aplicada, con un enfoque exploratorio y descriptivo. La muestra incluyó los circuitos de ventilación de la UEA Santa Filomena. La información técnica recopilada permitió modelar el circuito de ventilación usando el software VentSim. Los resultados mostraron que mediante el desarrollo de la chimenea de ventilación y el crucero 2170 con la implementación de un ventilador de 15,000 cfm de capacidad y uso de mangas paralelas se obtuvo una cobertura de aire en la veta Santa Filomena que asciende a 115%, con un excedente de 126.49 m³/min. Se concluyó que, en el futuro, la veta Santa Filomena podría enfrentar problemas de ventilación, por lo que se recomienda incluir la construcción de chimeneas de ventilación en los proyectos para mejorar el flujo de aire.

2.2. Bases teóricas

2.2.1 Fundamentos

2.2.1.1 Atmósfera de mina

La atmósfera de mina hace referencia a la composición del aire dentro de las galerías subterráneas, la cual debe ser controlada para asegurar que se mantenga dentro de límites adecuados de oxígeno y libre de gases peligrosos. Esta atmósfera se regula para garantizar la seguridad y el bienestar de los trabajadores, así como para evitar incidentes derivados de la presencia de gases tóxicos o explosivos (Tejada y Mucha, 2022).

2.2.1.1.1 Categorías de aire en minería subterránea

El aire en las minas se trata de una combinación de gases y partículas en estado de suspensión que fluyen durante las operaciones mineras y proviene de la atmósfera. Durante su circulación por las minas, esta mezcla cambia de temperatura, composición y contenido de partículas debido a la presencia de personas, maquinaria y procesos mineros. Se divide en dos categorías:

- **Aire viciado:** Muestra cambios significativos en la composición y compete

con el fluido de la mina. Este aire contaminado puede o no ser respirable dependiendo del nivel de contaminación presente.

- **Aire fresco:** Compete con el fluido que ingresa a la mina y presenta pequeñas variaciones con respecto al aire ambiente teórico.

El aire en la mina experimenta cambios en la humedad, la temperatura y el contenido de gases tales como CO₂ (dióxido de carbono), CO (monóxido de carbono), CH₄ (metano) y SO₂ (dióxido de azufre), entre otros, a bajas concentraciones, lo que resulta en el aire exhausto. (Tejada y Mucha, 2022).

2.2.1.1.2 Características del aire en minería subterránea

El aire que existe dentro de una mina o en una explotación a cielo abierto se conoce como atmósfera de mina. Debido a las características de la actividad minera, el aire en este lugar está compuesto por gases, polvo y partículas provenientes de (Herrera J. , 2019).

- Oxidaciones (producidas por la respiración, la descomposición de materia orgánica, motores de combustión interna, explosivos, etc.): CO₂, CO, NO, NO₂, SO₂ y material particulado.
- Gases naturales de la mina: CH₄ y SH₂.

Los polvos de roca extraídos del proceso de laboreo minero incluyen carbón y sílice (Herrera, 2019).

- Sustancias diferentes.
- Temperatura (profundidad, calor corporal, maquinaria, oxidaciones, etc.)
- La humedad
- La intensidad de la contaminación.

2.2.1.1.3 Consideración en el control de agentes químicos

a. Valores límites permisibles de agentes químicos

Según el Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en la actividad minera, es crucial que el sistema de ventilación garantice que los límites de exposición a agentes químicos se mantengan dentro de los estándares establecidos. Esto implica realizar verificaciones antes de cada jornada y al ingresar a las labores, especialmente las ciegas programadas, se deben medir los gases tóxicos. Estos resultados deben registrarse y comunicarse a los trabajadores que accederán a dichas áreas. En consideración a ello, existen los límites TWA (Time Weighted Average), STEL (Short Time Exposure Level) y C (Ceiling).

El TWA es la media ponderada en el tiempo que hace referencia al promedio de la concentración de un químico que se encuentra presente en la respiración del trabajador, para lo cual se aplica la siguiente fórmula:

$$TWA = \frac{\sum Ci Ti}{8}$$

Donde: Ci es la concentración y Ti es el tiempo en el que el trabajador se encuentra expuesto.

STEAL es conocida como la exposición de corta duración, en la cual el trabajador se encuentra expuesto al contaminante como máximo 15 minutos.

Ceiling es conocido como el límite techo, donde, el trabajador se encuentra expuesto a la presencia de sustancias irritantes, por lo que deben emplear sus EPPs antes de ingresar, garantizando la protección del trabajador.

b. Límite Máximo Permisible de gases en minería

Los accidentes a causa de intoxicación se encuentran entre los peligros de envenenamiento más comunes en la minería subterránea, pues, los trabajadores deben ser conscientes de la presencia de gases peligrosos. Entre ellos se incluyen el CO₂ (dióxido de carbono), el N₂ (nitrógeno), el CO (monóxido de carbono), el SO₂ (dióxido de azufre)

y el H₂S (sulfuro de hidrógeno), los gases nitrosos, entre otros. Los trabajadores mineros están expuestos a la presencia de estos gases en el ambiente. En la siguiente tabla se muestran los límites máximos permitidos para los gases en la minería subterránea en Perú. (Helguero y Medinaceli, 2020):

Tabla 2

Límites máximos permisibles de los gases más frecuentes en las minas peruanas

GAS	EN PPM.	(%)
O ₂	-	19.5% mínimo
CO	25	0.0025%
NO ₂	5	0.0005%
CO ₂	5000	0.5%
SO ₂	5	0.0005%
H ₂ S	10	0.001%
CH ₄	5000	0.5%
H ₂	5000	0.5%

Nota: Tomado de (Helguero y Medinaceli, 2020).

2.2.1.1.4 Material particulado en minería

El polvo es una colección de pequeñas partículas con un diámetro de 1 a 100 micrones, que pueden permanecer en el aire por un tiempo, asimismo, el polvo es un material sólido muy fino que depende del tamaño, concentración y composición de las partículas, puede suponer un riesgo para la salud de los trabajadores y la seguridad de la operación.

La distribución granulométrica del polvo de mina es uno de los parámetros más importantes porque el tamaño de las partículas sólidas determina cuánto tiempo permanecen en suspensión en la atmósfera y sedimentan.

El polvo se ha definido o descrito utilizando una variedad de medidas, como (Ventius, 2017).

- Superficie específica de partículas por unidad de volumen.

- Dimensión y dispersión de partículas.
- La estructura química del polvo.
- La naturaleza mineral de las partículas.
- Número de partículas por volumen de unidad.
- Densidad de polvo por unidad de volumen de aire.

La distribución granulométrica del polvo de mina es uno de los parámetros más importantes porque el tamaño de las partículas sólidas determina cuánto tiempo permanecen en suspensión en la atmósfera y sedimentan.

Figura 3

Material particulado en minería



Nota. Tomado de EcoPortal, 2013.

2.2.1.2 La ventilación en minería subterránea

El objetivo es proporcionar aire limpio a todos los trabajadores que laboran en operaciones mineras subterráneas para lograr condiciones ambientales y de temperatura-ambiente adecuadas, así como monitorear el funcionamiento de los diversos equipos e instalaciones subterráneas (Tejada y Mucha, 2022).

2.2.1.2.1 Objetivos de la ventilación en minas subterráneas

- Garantizar un suministro de oxígeno adecuado para posibilitar el suministro de aire adecuado para la respiración de las personas.
- Asegurar un suministro de aire adecuado para los equipos y dispositivos diéseles ubicados bajo tierra.
- Evitar mezclas explosivas,
- Retirada y eliminación de gases nocivos y partículas de polvo
- Disminución de la temperatura ambiental. (Tejada y Mucha, 2022).

2.2.2.2 Tipos de ventilación

a. Ventilación natural

Es aquella diferencia entre densidades entrantes y salientes, en tal sentido se evidencia la variación respecto al grado de humedad y composición del aire (química), resaltando las ventajas de emplearse en minas; se recalca que tiene la principal función de garantizar y controlar la temperatura presente en los ambientes debido a que suelen cambiar de acuerdo a las temporadas anuales; es así que, la presente ventilación de la mina depende de la resistencia para soportar caudales de aire entre 10 y 500m³/min (Fonttis, 2020).

b. Ventilación mecánica

También es conocida como ventilación forzada, haciendo referencia a los sistemas que proveen de aire fresco a las áreas confinadas de las minas subterráneas; asimismo, estas se encargan de eliminar los contaminantes del aire por medio de ductos auxiliares, de igual manera, este tipo de ventilación es conocido como la diferencia de presiones que se ejercen en un dispositivo que requiere energía eléctrica, en tal sentido, estos son empleados cuando la ventilación natural no cumple con requisitos de caudal y velocidad (Ricse, 2021).

Figura 4

Ventilación mecánica subterránea en minería



Nota. Tomado de Minería chilena, 2014.

b.1. Ventilación Primaria

Son aquellos en los que ingresa y sale flujos de aire, los cuales circulan dentro de las minas, reconociendo que su principal característica es que son de gran capacidad y se mantienen encendidos durante todo el día, estos se localizan en los conductos principales y se alimentan únicamente de corriente eléctrica (Ricse, 2021).

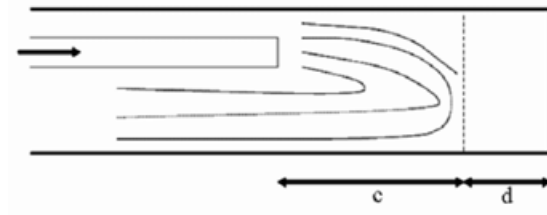
b.2. Ventilación Secundaria

Son aquellos que sostienen los ventiladores principales y se encargan de la rotación de aire dentro del circuito, estos cuentan con una capacidad y potencia media, sin embargo, permanecen activos y se encuentran instalados encima de una base de hormigón, asimismo, su función se centra en la resistencia de ramales críticos (Ricse, 2021).

b.2.1 Ventilación soplante

Dentro de sus ventajas se puede indicar que únicamente operan con flujos de aire limpio, donde, no se evidencia fugas de aire seco; sin embargo, como sus desventajas se afirma la recirculación de aire viciado, es así que se resalta que el presente sistema de ventilación es impulsado por una tubería de aire que retorna a la galería (Herrera J. , 2019).

Figura 5
Ventilación soplante



Nota. Tomado de Herrera, 2019.

Donde

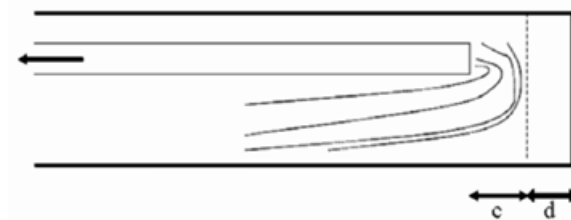
c = Zona de agitación

d = Zona de aire inmóvil

b.2.2 Ventilación aspirante

Su principal problemática se centra cuando el foco de polvo no cuenta con velocidades altas, afectando la circulación de flujos aéreos, es así que las tuberías pueden estar hechas de poliéster con anillos de refuerzo para aumentar su rigidez, destacando que las tuberías son adquiridas a elevados costos (Herrera J. , 2019).

Figura 6
Ventilación aspirante



Nota. Tomado de Herrera, 2019.

Donde

c = Zona de agitación

d = Zona de aire inmóvil

b.2.3 Ventilación mixta

- **Con una conducción**

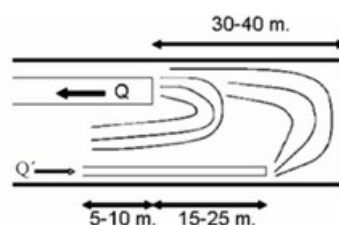
Cambia el sentido de giro del ventilador, se aspira una parte del tapón de humos, que puede tener una longitud L de 50 m (Herrera J. , 2019).

- **Con dos conducciones**

Presentan mayor diámetro y se encuentran a distancias de 30 y 40 metros al frente y sirve como aspiradora, resaltando que esta se encuentra conectada a un ventilador con menor diámetro, garantizando la suficiente agitación de aire (Herrera J. , 2019).

Figura 7

Ventilación mixta con dos conducciones



Nota. Tomado de Herrera, 2019.

b.3. Ventilación Auxiliar

La acción mecánica, especialmente a través del ventilador, genera la presión necesaria para garantizar un flujo de aire adecuado en galerías horizontales con una longitud mínima de 400 metros y una sección de 3,0 por 3,0 metros. Dependiendo del equipo utilizado para el desarrollo y la ubicación, es conveniente utilizar un sistema de extensión de mediana o baja capacidad. Las entradas y salidas de aire del sistema de ventilación general de la región. (Ventius, 2017).

2.2.2.3. Ventiladores en minería

Los ventiladores son dispositivos que permiten el movimiento del aire a través de un circuito, donde, es necesario aumentar la presión específica, causando la compensación de las pérdidas generadas en el mismo sistema, de igual manera, estas máquinas son las encargadas de generar presión en el trabajo y su campo de aplicación. Por otra parte, se resalta que el aumento de la presión en el dispositivo provee de una mejor calidad de aire

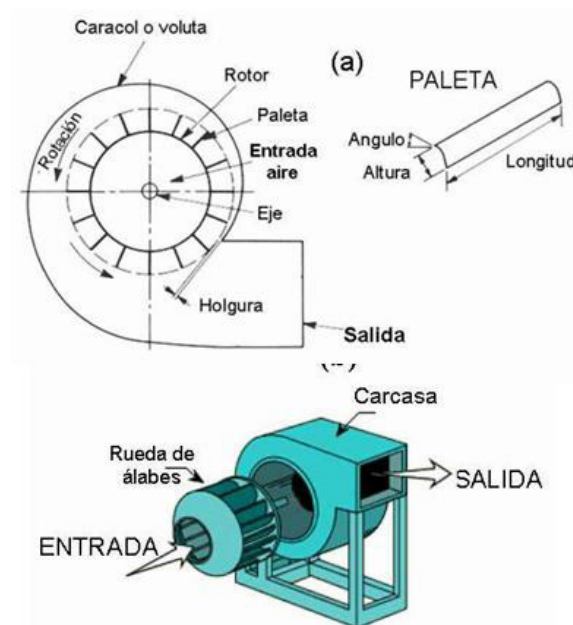
en diversos ambientes (Herrera J. , 2019).

a. Tipos de Ventiladores

- **Ventiladores centrífugos:** Este dispositivo tiene un rotor contenido dentro de una carcasa en forma de espiral. El rotor del ventilador succiona el aire a través de su ojo y lo expulsa hacia el interior de la carcasa en dirección a la proa. La salida correspondiente a la proa del ventilador puede ser simple o doble (Helguero & Medinaceli, 2020). Asimismo, el presente ventilador presenta una configuración de alabes inclinadas hacia atrás, mejorando la resistencia, sin embargo, hay riesgos de sobrecarga dado el aumento del caudal (Herrera J. , 2019).

Figura 8

Ventiladores centrífugos o radiales

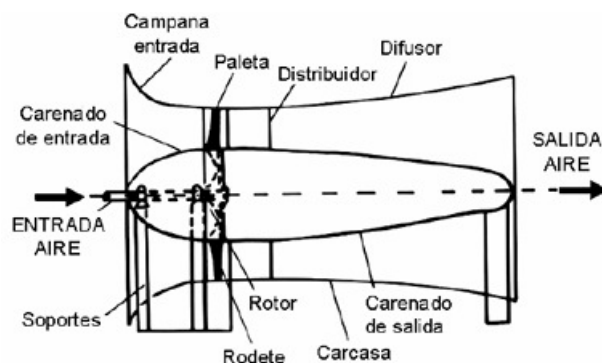


Nota. Tomado de Herrera, 2019.

- **Ventiladores Axiales:** Este tipo de ventilador consiste principalmente en un impulsor alojado dentro de una carcasa cilíndrica. Las diferencias entre el uso de ventiladores axiales y centrífugos se pueden resumir de la siguiente manera: los ventiladores axiales son más eficientes en una

variedad de puntos de operación, mientras que los ventiladores centrífugos pueden ser altamente eficientes, pero solo dentro de un rango específico y limitado de su curva característica. Este aspecto es crucial debido a los costos de energía, que deben considerarse cuidadosamente. Por lo tanto, la eficiencia es de suma importancia, y es más práctica lograr altos niveles de eficiencia en áreas operativas amplias con ventiladores axiales que con ventiladores centrífugos. (Helguero y Medinaceli, 2020). Asimismo, gracias a este ventilador se logra alejar flujos de aire del rotor, pues permanece lineal, destacando la dirección variable en los flujos de aire, generando pérdidas de carga o energía, en tal sentido, se evidencia la disminución del rendimiento (Herrera J. , 2019).

Figura 9
Ventiladores axiales



Nota. Tomado de Herrera, 2019.

- **Ventiladores de hélice:**

El presente ventilador se encuentra conformado por un rodete insertado al interior de una carcasa o anillo de montaje, mientras la dirección de la corriente es paralela a la del ventilador, en tal sentido, este tipo de ventiladores se utilizan para desplazar flujos de aire en circuitos con baja

resistencia, resaltando la presión estática baja, la cual puede manejar grandes cantidades de aire (Herrera J. , 2019).

Figura 10
Ventiladores de hélice

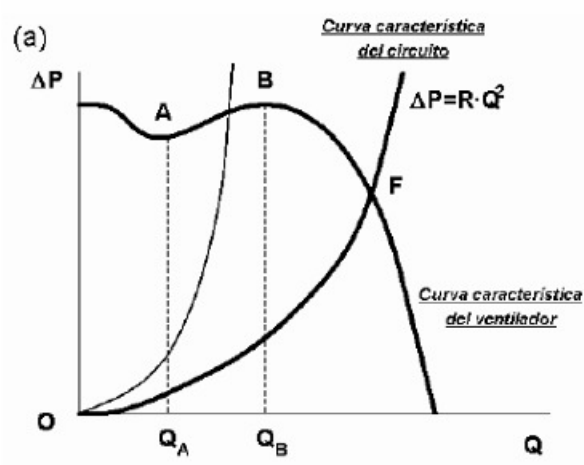


Nota. Tomado de Herrera, 2019.

b. Curva característica del ventilador

Cada ventilador tendrá una curva distintiva, que es la ubicación geográfica de los puntos de funcionamiento para cada ángulo de regulación de los álabes. Como resultado, cada ángulo tendrá su propia curva característica, asimismo, el punto de funcionamiento del ventilador es el punto de corte de la curva característica de la resistencia del circuito (Herrera J. , 2019).

Figura 11
Curva característica del ventilador



Nota. Tomado de Herrera, 2019.

La Figura 11 ilustra las curvas características del sistema de ventilación subterránea, que se utilizan para identificar el punto de operación óptimo.

Donde:

- ΔP : Diferencia de presión.
- Q: Flujo de aire.
- Punto A: Indica un flujo de aire QA en la curva del ventilador.
- Punto B: Indica un flujo de aire QB en la curva del ventilador.

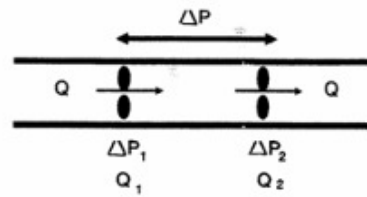
Se resalta que la curva ABF muestra cómo un ventilador puede proporcionar una amplia gama de presiones y flujos, por ende, el punto de bombeo se encarga de separar el funcionamiento normal y estable, mientras, ocurrirán variaciones en la curva dado que se desplaza hacia arriba, proporcionando una mayor presión (Herrera J. , 2019).

c. Acoplamiento de ventiladores

Acoplamiento en serie

Es la disposición de dos o más ventiladores de manera que sus salidas de aire estén conectadas en serie, de modo que el flujo de aire generado por el primer ventilador se canalice directamente hacia el segundo y así sucesivamente. En este tipo de configuración, el flujo de aire total es el mismo a través de todos los ventiladores, pero la presión estática total aumenta a medida que el aire pasa por cada uno de ellos. El acoplamiento en serie se utiliza para superar resistencias o pérdidas de presión significativas en un sistema, lo que permite vencer obstáculos en el flujo de aire (Herrera, 2019).

Figura 12
Acoplamiento en serie

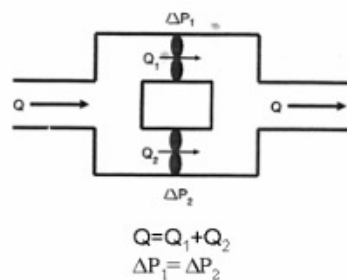


Nota. Acoplamiento en serie. Introducción a la ventilación minera (p. 87), Herrera Juan, 2019

Acoplamiento en paralelo

La conexión de dos o más ventiladores de manera que sus entradas de aire estén conectadas en un punto común, mientras que sus salidas de aire trabajan de manera independiente. En esta configuración, cada ventilador contribuye con su propio flujo de aire individual al sistema, lo que resulta en un mayor caudal total de aire en comparación con un solo ventilador. El acoplamiento en paralelo se utiliza para aumentar el flujo de aire total en situaciones donde se necesita un mayor volumen de aire, como en sistemas de ventilación o enfriamiento que requieren un aumento de la capacidad de movimiento del aire (Herrera, 2019).

Figura 13
Acoplamiento en paralelo



Nota: Acoplamiento en paralelo. Introducción a la ventilación minera (p. 88), Herrera

Juan, 2019

2.2.1.4. Cálculos que se usan en ventilación subterránea

Los ventiladores son dispositivos que permiten el movimiento del aire a través de un circuito, donde, es necesario aumentar la presión específica, causando la compensación de las pérdidas generadas en el mismo sistema, de igual manera, estas máquinas son las encargadas de generar presión en el trabajo y su campo de aplicación. Por otra parte, se resalta que el aumento de la presión en el dispositivo provee de una mejor calidad de aire en diversos ambientes (Herrera J. , 2019).

a. Leyes de Kirchhoff

Dado que las tasas de flujo de aire y las caídas de presión están relacionadas con el flujo de corriente eléctrica y el valor del voltaje, se aplicarán dos principios básicos que gobiernan el funcionamiento de los circuitos eléctricos sintonizados analógicamente.

Estas normas son (Ramírez y Fuentes, 2019):

- a) Primera ley de Kirchhoff:** La ley de corriente o flujo establece que la cantidad de flujo en un sistema es proporcional a la diferencia de presión aplicada, ya sea de material o energía, es igual a la corriente eléctrica multiplicada por el tiempo que se libera del sistema debe ser igual a la energía liberada. En otras palabras, la suma del flujo de aire entrante y saliente del sistema debe ser igual a cero.
- b) Segunda Ley de Kirchhoff:** En un circuito eléctrico cerrado, se postula que la suma de las diferencias de potencial es igual a cero.

b. Método Hardy Cross

El método Hardy Cross permite calcular el flujo de aire dentro de la mina utilizando los datos de entrada, como el flujo, la presión y salida, sin embargo, no proporciona una representación precisa de la distribución del flujo en el interior de la mina. La red es

desconocida. (Ramírez y Fuentes, 2019)

El método de aproximación de la serie Hardy Cross se basa en el cumplimiento de las leyes de Kirchhoff:

- a) **Ley de Continuidad del Flujo en los Nodos:** En cada punto de conexión de tuberías, la entrada de flujo es igual a la salida de flujo.
- b) **Conservación de la energía en un circuito:** La caída de presión direccional total en cualquier circuito del sistema es cero.

Los pasos en el método de cruce duro se pueden enumerar de la siguiente manera:

- **Paso 1:** Al considerar cada conducto de la red de ventilación, es importante tener en cuenta los flujos más relevantes y asegurar que se cumpla la ley de continuidad en todo momento debe ser igual, es decir, $Q_{\text{entrada}} = Q_{\text{salida}}$. El caudal inicial de Q_0 debe considerarse como el caudal estimado en la primera iteración.
- **Paso 2:** Realice el cálculo de la pérdida de presión ocasionada por la fricción en cada tubería utilizando la siguiente expresión.

$$H_l = K * Q^n$$

- **Paso 3:** Realice el cálculo de la suma total de las pérdidas de presión en cada circuito primario.

$$\Sigma H_l = \Sigma (K * Q^n)$$

- **Paso 4:** Realice ajustes al flujo Q_0 en cada tubería mediante la corrección ΔQ para lograr un equilibrio de presión en el circuito, de acuerdo con la relación establecida en la ecuación.

$$\Sigma H_l = \Sigma (K * Q^n) = 0$$

- **Paso 5:** Repita hasta que ΔQ sea pequeño.

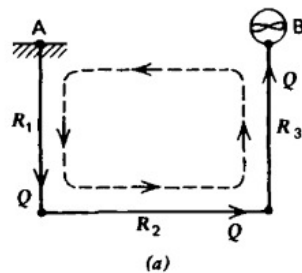
c. Cálculos de Redes

Es la sección que proporciona el contexto conceptual y el conocimiento previo necesario para comprender los métodos y enfoques utilizados en el análisis de sistemas interconectados, como circuitos eléctricos y redes de comunicación (Hartman et al., 1997).

Conexión en serie

Una conexión en serie se refiere a un diseño de circuito donde los componentes se interconectan secuencialmente, formando un camino único para la corriente eléctrica. En esta configuración, la misma corriente fluye a través de todos los componentes, lo que implica que la suma de las caídas de voltaje en cada componente equivale al voltaje total aplicado al circuito (Hartman et al., 1997).

Figura 14
Circuito en Serie

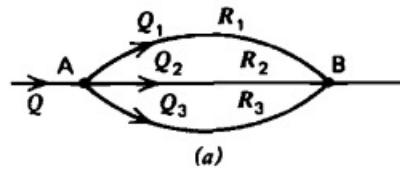


Nota: Circuito en serie con R_1 , R_2 y R_3 . Tomado de Mine Ventilation and Aire Conditioning (p. 247), por Hartman et al., 1997.

Conexión en paralelo

La conexión en paralelo implica que cada componente comparte el mismo voltaje, mientras que las corrientes se dividen entre ellos según sus características de impedancia o resistencia.

Figura 15
Circuito en paralelo



Nota: Circuito en serie con R1, R2 y R3. Tomado de Mine Ventilation and Aire Conditioning (p. 250), por Hartman et al., 1997.

c. Fórmula de Atkinson

La presión necesaria para desplazar el aire a través de una tubería o galería en una mina no está determinada únicamente por la resistencia interna, sino también por la extensión, el volumen, la configuración, la potencia del flujo y la rapidez del aire.

Indicando que la ecuación de J. Atkinson, también conocida como "Ley de Atkinson" o "Fórmula de Atkinson", contiene todos los factores mencionados anteriormente. Estas ecuaciones se utilizan para determinar la pérdida de presión requerida para el transporte de aire a través de tuberías o galerías en la mina. (Catalán, 2018).

$$p = \frac{KCLQ^2}{A^3} * \frac{w}{1.2} = \frac{KCLV^2}{A} * \frac{w}{1.2}$$

Donde

K = factor de fricción (Ns²/m⁴)

p= pérdida de presión (Pa)

C = perímetro (m)

L = longitud (m)

V = velocidad (m/s)

Q = flujo de cantidad (m³/s)

A = área (m²)

w = densidad del aire (Kg/m³)

d. Coeficiente de fricción

Cuando el aire turbulento se dirige hacia una superficie, la fricción transforma la energía del trabajo en energía. La rugosidad de la superficie aumenta la turbulencia, lo que aumenta la fricción y la pérdida de energía. Como resultado, una tubería rugosa tiene un coeficiente de fricción más alto que una tubería lisa. El factor "K" aumenta si hay demasiados obstáculos en la tubería (Catalán, 2018).

Donde:

$$K = \frac{pA^3}{LCQ^2}$$

e. Factor Fricción

Los distintos valores de "K" están establecidos por mediciones y cálculos; la siguiente tabla muestran algunos valores de fricción comunes (Catalán, 2018).

Tabla 3

Tabla de valores del Factor "K"

Conducto de ventilación	K(Ns ² /m ⁴)
Pique rectangular de madera	0.045 – 0.09
Pique circular revestido de hormigón	
1) Vacío	1) 0.0037
2) Con puntales divisorios	2) 0.0075 – 0.06
3) Con puntales divisorios aerodinámicos	3) 0.0045 – 0.025
Túnel subterráneo	0.011 – 0.018

Nota: Tomado de (Catalán, 2018)

f. Pérdida de Energía por choque

La pérdida de energía ocurre debido a alteraciones en la dirección de los caudales de aire

en el área de sección transversal de las tuberías. Estas pérdidas se pueden establecer mediante ecuaciones matemáticas, pero por motivos prácticos y de velocidad de cálculo, se puede utilizar el método de longitudes equivalentes (L_e). Se puede utilizar la ecuación de Atkinson (Quispe Caceres, 2019):

$$h_x = \frac{KPL_e}{5,2A^3} * Q^2$$

2.2.2 Diseño óptimo del sistema de ventilación

El diseño óptimo del sistema de ventilación se refiere al proceso de configuración y ajuste de los componentes del sistema de ventilación de una mina para maximizar su eficiencia, garantizar la calidad del aire y asegurar condiciones laborales seguras. Implica la selección adecuada de ventiladores, ductos y puntos de extracción de aire para proporcionar una cantidad suficiente de aire fresco, controlar la concentración de gases peligrosos y minimizar la energía requerida para mover el aire a través de la mina. Este diseño busca equilibrar los requisitos de ventilación con los costos operativos y de capital, mientras cumple con las regulaciones de seguridad y salud ocupacional vigentes (Brune, 2019).

2.2.2.1 Requerimiento de aire en labores mineras

El cálculo del requerimiento de aire en una mina se realiza conforme a lo establecido en la normativa peruana del Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional D.S. 023-2017-EM.

Caudal necesario para los trabajadores

Se refiere a la cantidad mínima de aire que requiere cada persona en función de la altitud en la que se esté desempeñando. Esta cantidad se establece conforme a la escala descrita en el artículo 247 del Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional (MINEM, 2017).

- Entre 0 y 1,500 metros sobre el nivel del mar (msnm), la cantidad mínima

de aire requerida será de 3 m³/min.

- Entre 1,500 y 3,000 msnm, la cantidad de aire incrementará un 40%, alcanzando los 4 m³/min.
- Entre 3,000 y 4,000 msnm, el incremento será del 70%, resultando en 5 m³/min.
- Por encima de los 4,000 msnm, el incremento será del 100%, siendo la cantidad mínima de aire de 6 m³/min.

Con base en esta escala, el caudal de aire necesario para el personal se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$QTr = N \times F$$

- *QTr*: Caudal total de aire para "n" trabajadores, expresado en m³/min;
- *F*: Caudal mínimo de aire por persona, según lo especificado en la escala del artículo 247 del D.S. 023-2017-EM;
- *N*: Número de trabajadores pertenecientes a la guardia con mayor cantidad de personal.

Caudal de aire necesario para equipos con motor diésel

El caudal de aire necesario para los equipos con motor diésel en la mina se debe calcular considerando que estos equipos, debido a la combustión incompleta, emiten gases contaminantes. De acuerdo con el artículo 252 del Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional, el requerimiento mínimo de aire para cada equipo no debe ser inferior a 3 m³/min por cada unidad de potencia efectiva, teniendo en cuenta la disponibilidad mecánica y su utilización, como se expresa en la siguiente ecuación. (MINEM, 2017).

$$Q_{Eq} = 3 \times HP \times Dm \times Fu$$

Donde:

- *Q_{Eq}* es el volumen de aire requerido para la ventilación (en m³/min);

- HP es la capacidad efectiva de potencia de los equipos (en HP);
- Dm representa el porcentaje de disponibilidad mecánica promedio de los equipos;
- Fu es el factor de utilización promedio de los equipos (en %).

Caudal de aire necesario debido al uso de madera

La ecuación que se presenta a continuación representa la fórmula utilizada para calcular el caudal de aire necesario debido al consumo de madera.

$$Q_{Ma} = T \times u \text{ (m}^3\text{/min)}$$

Donde:

- Q_{Ma} : Volumen de aire requerido por tonelada de producción (m³/min).
- u: Factor de producción conforme a la escala establecida en el segundo párrafo del literal d) del artículo 252 del reglamento.
- T: Producción en toneladas métricas húmedas por cada turno de trabajo.

Tabla 4

Factor de producción según consumo de madera

Consumo de madera (%)	Factor de producción (m³/min)
< 20	0.00
20 a 40	0.60
41 a 70	1.00
>70	1.25

Nota: Tomado de (MINEM, 2017).

Flujo de aire necesario según la temperatura en las áreas de trabajo

La ecuación siguiente indica los factores a considerar para calcular el caudal necesario en función de la temperatura.

$$Q_{Te} = V_m \times A \times N \text{ (m}^3\text{/min)}$$

Donde:

- Q_{Te} corresponde al caudal de aire en función de la temperatura (m³/min);
- V_m representa la velocidad mínima del aire;
- A es el área promedio de la labor;
- N indica la cantidad de niveles donde la temperatura excede los 23°C, conforme a lo especificado en el tercer párrafo del inciso d) del artículo 252 del reglamento aplicable.

Tabla 5

Velocidad mínima por temperatura

Temperatura seca (°C)	Velocidad mínima (m/min)
< 24	0.00
24 a 29	30.0

Nota: Tomado de (MINEM, 2017).

Flujo necesario debido a fugas

La ecuación siguiente indica los factores a considerar para calcular el caudal necesario debido a fugas. (MINEM, 2017).

$$Q_{Fu} = 15\% \times Q_{t1} \text{ (m}^3\text{/min)}$$

Donde:

- Q_{t1} es la suma de Q_{Tr} , Q_{Te} , Q_{Ma} y Q_{Eq}
- Q_{Fu} representa el flujo de aire necesario debido a fugas (m³/min)

Demanda total de aire

En caso de utilizar equipos con motor diésel durante la operación: La cantidad de aire requerida dentro de la mina debe calcularse según lo establecido en el inciso d) del artículo 252 del reglamento, empleando la siguiente fórmula (MINEM, 2017).

$$Q_{To} = Q_{T1} + Q_{Fu}$$

Donde:

- Q_{To} : Flujo total de aire necesario para la operación;
- Q_{T1} : Suma del flujo requerido para los trabajadores, equipos con motor diésel, consumo de madera y condiciones de temperatura en las áreas de trabajo;
- Q_{Fu} : 15% de Q_{T1} .

De acuerdo con el artículo 246 del Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional DS 023-2017 EM, al calcular el flujo total necesario para labores auxiliares, se debe garantizar una cantidad y calidad adecuadas de aire limpio y fresco, basándose en el número de trabajadores y la potencia efectiva total (HP) de los equipos de combustión incompleta (MINEM, 2017).

$$Q_{Taux} = (Q_{T1} + Q_{Fu})$$

Donde:

- Q_{Taux} : Flujo total de aire requerido para las labores auxiliares;
- Q_{T1} : Flujo de aire calculado en función del número de trabajadores y equipos con motor diésel;
- Q_{Fu} : 15% del Q_{T1} .

2.2.2.2 Volumen de aire requerido por trabajador

El volumen de aire requerido por trabajador se refiere a la cantidad mínima de aire fresco que debe ser suministrada a cada persona en una mina subterránea, con el fin de garantizar un ambiente laboral seguro y saludable. Este valor está determinado por factores como la altitud de la mina, la actividad física de los trabajadores y las condiciones ambientales del lugar. La normativa establece ciertos parámetros mínimos para asegurar una ventilación adecuada que prevenga problemas de salud relacionados con la exposición a gases tóxicos

y la falta de oxígeno (Escobar y Rodas, 2020).

2.2.3 Distribución del flujo de aire

La distribución del flujo de aire en un sistema de ventilación subterránea hace referencia al control y direccionamiento adecuado del aire fresco hacia las diferentes áreas de trabajo de la mina, garantizando que cada sector reciba la cantidad necesaria de aire para mantener condiciones seguras y salubres. Este proceso implica el uso de ventiladores, conductos y otras estructuras que permiten que el aire fluya eficientemente, eliminando gases tóxicos y manteniendo niveles aceptables de temperatura, humedad y concentración de oxígeno. Una distribución óptima del flujo de aire es clave para la seguridad de los trabajadores y la operación eficiente de la mina (Gutiérrez, 2019).

2.2.3.1 Recirculación de aire viciado

Este efecto ocurre cuando el aire se mantiene dentro de un sistema cerrado, cuando se coloca un ventilador en serie, en tal sentido, el flujo natural de aire es menor a la capacidad de funcionamiento, es así, que en ciertos reglamentos se especifica la necesidad de instalar ventiladores secundarios para aumentar suministros de aire, de igual manera, se especifica que se requiere contar con un caudal de 1.5 el cual depende de la localización del ventilador, resaltando que los trabajadores deben mantenerse en ambientes con adecuada calidad de aire (Camargo y Segura, 2023).

2.2.3.2 Presión

Cuando el aire se mueve, requiere de una fuerza específica para impulsarlo. Esta fuerza, aplicada sobre una unidad de superficie, se denomina presión. Hay dos tipos principales de presión (Soler & Palau, 2009).

Presión estática

Es la presión generada por el flujo de aire que se mueve en todas direcciones sobre las

paredes de un cuerpo (Soler & Palau, 2009).

Presión dinámica

La presión dinámica es la que acelera el aire desde un estado de reposo hasta alcanzar una velocidad constante, su movimiento ocurre en una dirección definida (Soler & Palau, 2009).

Presión total

Es la presión aplicada a un cuerpo que resulta de la combinación de la presión estática y la presión dinámica. (Soler & Palau, 2009).

2.2.4 Incremento de la productividad de los trabajadores

El incremento de la productividad de los trabajadores se refiere a la mejora en el rendimiento laboral mediante la optimización de las condiciones de trabajo, como la ventilación, seguridad, ergonomía y eficiencia operativa. Esto se traduce en mayor cantidad de trabajo realizado en menos tiempo, reducción de pausas, y mejor bienestar físico y mental, lo que contribuye a una mayor eficiencia general (Hernández, 2015).

Medidas a implementar para el mejoramiento de la productividad del personal minero

Se refieren a las acciones específicas y estrategias que se pueden adoptar en una operación minera con el propósito de incrementar la eficiencia, rendimiento y desempeño de los trabajadores. Estas medidas pueden incluir la implementación de programas de capacitación y entrenamiento para el desarrollo de habilidades técnicas y operativas, el establecimiento de incentivos y reconocimientos para fomentar la motivación y el compromiso del personal, la mejora de las condiciones de trabajo y seguridad en la mina, la adopción de tecnologías y herramientas más avanzadas, así como la promoción de un ambiente laboral positivo y colaborativo. Estas acciones tienen como objetivo optimizar

el uso de los recursos humanos y generar un impacto positivo en la productividad global de la empresa minera (Blunch, 2018).

Relación entre el requerimiento de aire fresco en labores subterráneas y el desempeño del personal

Se refiere a la conexión y la influencia que tiene la cantidad y calidad de aire fresco suministrado en una mina subterránea en el rendimiento y bienestar de los trabajadores. Un suministro adecuado de aire fresco es esencial para garantizar que los mineros gocen de un ambiente seguro y saludable, lo que a su vez puede afectar positivamente su productividad, capacidad de concentración, toma de decisiones y disminución de fatiga durante las tareas laborales. La disponibilidad de aire fresco suficiente y bien ventilado puede contribuir significativamente a mejorar el rendimiento del personal en la mina subterránea (Gür et al, 2018).

Además, la ventilación presente en las labores subterráneas contribuye en lo siguiente (Positiva, 2017):

- Garantiza la presencia de oxígeno.
- Permite que se cumplan con los LMP, reduciendo la presencia de contaminantes tóxicos o asfixiantes.
- Adecúa la temperatura del aire para mantener fresco el ambiente.
- Garantiza el confort térmico, permitiendo que los trabajadores se desempeñen en un ambiente seguro.

2.2.4.1 Adecuadas condiciones de trabajo

2.2.4.1.1 Condición del ambiente laboral en minería subterránea

Esto se refiere a los diversos factores físicos, químicos y biológicos que se encuentran en el entorno de trabajo de los mineros en un ambiente subterráneo. Estos factores abarcan la calidad del aire, la temperatura, la humedad, la presencia de gases tóxicos, partículas

de polvo, ruido, iluminación y otros elementos que pueden influir en la salud, seguridad y bienestar de los trabajadores. Evaluar y gestionar adecuadamente estas condiciones laborales es crucial para asegurar un entorno de trabajo seguro y saludable en la minería subterránea. (Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2016).

– **Control de calidad**

Los procedimientos de control pueden ser implementados de manera individual o conjunta. Si el objetivo es lograr un acondicionamiento total del aire en la mina, es necesario cumplir con tres objetivos y es posible utilizar varias operaciones simultáneamente. De este modo, diferentes métodos pueden desempeñar múltiples funciones, siendo la ventilación el más común. (Hartman et al, 1997).

– **Control de cantidad**

En este contexto, es crucial equilibrar tanto la magnitud como la dirección de los flujos de aire. Es esencial contar con sistemas de ventilación que aseguren la provisión de aire limpio en los entornos mineros. Asimismo, es importante abordar directamente las problemáticas relacionadas con la ventilación (Hartman et al, 1997).

– **Control de temperatura y humedad**

En esta situación, es crucial monitorear continuamente factores como la temperatura y la humedad, ya que pueden fluctuar debido a su sensibilidad. Sin embargo, es necesario mantener un control adecuado sobre el frío, el calor, la humidificación y la deshumidificación (Hartman et al, 1997).

Ambiente para elevar la productividad

Para abordar los desafíos de mejorar el desempeño de la productividad a largo plazo se toma en cuenta los siguientes aspectos:

- Orientados a liberar personas y recursos de manera eficiente, con un enfoque en la reducción de los costos de proceso. Mantenga sus operaciones enfocadas en la productividad al integrar un sistema operativo de administración efectivo diseñado.
- Priorizar la eficiencia operativa y el desarrollo del talento que requieran la integración de sistemas productivos y de mejora continua en la organización. Fomente el trabajo estandarizado y la ejecución disciplinada de procesos para mejorar el rendimiento a lo largo del tiempo.
- Fomentar la innovación y la adopción de tecnología que agilice los procesos, facilitando la información tanto para las empresas mineras como para los contratistas para aprovechar las grandes cantidades de datos que se recopilan de forma rutinaria para el control de procesos. (APRIMIN, 2017)

2.2.4.1.2 Temperatura

Se trata de una magnitud que expresa numéricamente la percepción de calor o frío. Cuando la temperatura aumenta, se detecta una mayor cantidad de calor en el ambiente. Para su medición, se emplean instrumentos como termómetros comunes, psicrómetros, termohigrómetros, dispositivos de resistencia variable con coeficientes de temperatura, y anemómetros térmicos, entre otros. Es tos equipos permiten medir dos tipos de temperatura: la seca y la húmeda (McElroy, 1935).

Temperatura Seca

La temperatura seca es aquella que se mide con un termómetro de mercurio convencional, sin tener en cuenta la humedad relativa ni la velocidad del aire.

Temperatura Seca

La temperatura húmeda se refiere a la medición de la temperatura cuando está en contacto

con agua en estado líquido, lo que afecta la capacidad de retener más o menos vapor de agua.

En las minas subterráneas, la temperatura está influenciada por diversos factores.

- La temperatura del aire exterior que ingresa por las bocaminas varía según la estación del año; en verano tiende a ser más cálida, mientras que en invierno es más fría.
- El calor por compresión influye en el aumento de la temperatura del aire a medida que se desciende en la mina. Por cada metro de profundidad, la temperatura se incrementa en 0.0098 °C, lo que equivale a un aumento de 10 °C por cada 1000 metros de profundidad.
- La temperatura de la roca calienta el aire a medida que este circula a través de ella. El incremento de la temperatura varía dependiendo de factores como la composición de la roca y la presencia de agua, entre otros.
- Procesos químicos, como la oxidación de pirita y carbón, así como la descomposición de maderas, también contribuyen al aumento de la temperatura.
- La evaporación del agua genera un enfriamiento no deseado debido a procesos endotérmicos, lo que eleva la humedad relativa y empeora las condiciones en la mina, haciéndolas difíciles de soportar.
- La velocidad del aire influye en el desempeño del trabajador, ya que el aire en movimiento facilita la disipación del calor corporal hacia el entorno. (Diaz,2019).

2.2.4.1.3 Gases en mina

Las concentraciones de gases en las operaciones mineras se generan por el uso de explosivos, la descomposición de materiales orgánicos, combustiones espontáneas,

incendios, reacciones químicas de los minerales y la combustión incompleta de equipos mecanizados. El riesgo de intoxicación o exposición a gases es un peligro común en la minería subterránea, ya que cualquier gas tóxico que supere los límites permitidos puede provocar accidentes y comprometer la salud de los trabajadores. (McPherson, 2009).

Monóxido de carbono, CO

El monóxido de carbono se genera por la combustión incompleta de materiales carbonosos. Es un gas incoloro, inodoro e insípido, con una densidad muy similar a la del aire. Su combustión produce una llama azul y tiene un amplio rango de inflamabilidad (12.5 a 74.2), con una explosividad máxima del 29%, lo que lo convierte en responsable de más del 90% de los accidentes fatales en incendios mineros.

Este gas es altamente tóxico y, debido a su facilidad para mezclarse con las corrientes de aire, es uno de los más peligrosos. La afinidad del monóxido de carbono con la hemoglobina es 250 a 300 veces mayor que con el oxígeno, por lo que al inhalarse, se combina con la hemoglobina formando un compuesto estable y difícil de descomponer llamado carboxihemoglobina (COHb), lo que reduce la capacidad de los glóbulos rojos para transportar oxígeno, provocando la muerte. (McPherson, 2009).

Tabla 6

Reacciones del cuerpo ante la exposición al monóxido de carbono

Porcentaje de saturación de la sangre con COHb (%)	Reacción
5-10	Posible pérdida leve de concentración.
10-20	Sensación de opresión en la frente, dolor de cabeza leve.
20-30	Dolor de cabeza fuerte, juicio deteriorado.
30-40	Dolor de cabeza severo, mareos, desorientación,

	visión atenuada, náuseas, posible colapso.
40-60	Mayor probabilidad de colapso, se eleva las tasas de pulso y respiración, convulsiones.
60-70	Coma, pulso y respiración deprimida, peligro de muerte.
70-80	Muerte.

Nota: Tomado de McPherson (2009).

Óxidos de nitrógeno, NO_x

Estos óxidos aparecen en diversas formas, como N₂O, NO₂, N₂O₂, N₂O₃ y N₂O₅. Generalmente no se encuentran aislados y, en altas concentraciones, tienen un color rojizo y un olor penetrante. El peso específico del NO es 1.02 y el del NO₂ es 1.58 en relación con el aire, siendo el NO₂ el más tóxico y fácilmente soluble en agua.

Estos óxidos se generan por la combustión incompleta durante los procesos de voladura, especialmente cuando se utiliza ANFO. Provocan irritación y, en concentraciones más elevadas, pueden causar efectos corrosivos en los ojos y el sistema respiratorio. Su efecto es engañoso, ya que una persona puede mostrar signos de recuperación inicial, pero luego desarrollar bronconeumonía aguda. (McPherson, 2009).

Tabla 7

Reacciones del cuerpo ante la exposición al dióxido de nitrógeno (ppm)

Concentración de dióxido de nitrógeno (ppm)	Reacción
40	Detectable mediante el olor.
60	Irritación leve en la garganta.
100	Tos, irritación de los ojos y vías respiratorias.
150	Incomodidad severa, que puede provocar neumonía.
200	Peligroso de muerte.

Nota: Tomado de McPherson (2009).

2.2.3.2 Toneladas producidas por hombre guardia

Es una medida de productividad que indica la cantidad de toneladas extraídas o procesadas por cada trabajador durante un turno completo de trabajo. (Llano, 2017).

$$TM/HH/Gdia = \frac{Cantidad\ de\ Toneladas\ rotas\ por\ Guardia}{Tiempo\ total\ de\ operación\ x\ Número\ de\ trabajadores\ por\ Guardia}$$

2.3. Definición de términos

Caudal de aire

El caudal de aire se refiere a la cantidad de flujo de aire que circula en un sistema, ambiente o conducto en una unidad de tiempo específica. En el contexto laboral, el caudal de aire puede ser relevante para evaluar la ventilación y la calidad del aire en espacios confinados, como minas o ambientes industriales (Perry et al., 1997).

Cambios de Temperatura

En minas profundas, la temperatura puede variar considerablemente con respecto a la superficie. Se requieren medidas para mantener una temperatura confortable para los trabajadores y para evitar problemas de condensación (Tejeda y Mucha, 2022).

Composición del Aire

La atmósfera en una mina puede estar compuesta por oxígeno, nitrógeno, dióxido de carbono y otros gases en diferentes proporciones en comparación con la atmósfera exterior. La presencia de gases peligrosos, como metano (en minas de carbón) o radón, puede requerir medidas de control específicas (Tejeda y Mucha, 2022).

Concentración de gases tóxicos

La concentración de gases tóxicos se refiere a la cantidad de gases peligrosos presentes en el aire en partes por millón (ppm). Es un indicador importante para evaluar la calidad del aire y determinar si es necesario implementar medidas de ventilación adicionales para reducir los niveles de gases tóxicos y proteger la salud de los trabajadores. (NIOSH, 2014)

Contaminantes Atmosféricos

Las actividades mineras pueden liberar polvo, gases tóxicos y partículas en suspensión en el aire. El polvo puede generar problemas respiratorios y contribuir a la formación de explosiones de polvo en minas de carbón. Ejemplos de contaminantes incluyen sílice, asbesto y humos de soldadura (Tejeda y Mucha, 2022).

Humedad

Dependiendo de la ubicación y la profundidad de la mina, la humedad puede ser un desafío importante. Altos niveles de humedad pueden afectar la comodidad de los trabajadores y provocar la corrosión de equipos y estructuras (Tejeda y Mucha, 2022).

Humedad relativa

La humedad relativa se define como el porcentaje de vapor de agua presente en el aire en relación con la máxima cantidad de vapor que el aire podría contener a una temperatura específica. Este parámetro es fundamental para evaluar el nivel de humedad en el entorno laboral y entender su impacto en la salud y el desempeño de los trabajadores. (OSHA, 2003)

Iluminación

La falta de luz natural en el interior de una mina requiere iluminación artificial. Las condiciones de iluminación pueden afectar la seguridad y la fatiga visual de los trabajadores (Tejeda y Mucha, 2022).

Ruido

Las maquinarias y las operaciones mineras pueden generar niveles significativos de ruido. La exposición prolongada al ruido puede afectar la audición y el bienestar general de los trabajadores (Tejeda y Mucha, 2022).

Seguridad

La atmósfera en una mina puede volverse peligrosa si no se controla adecuadamente. Las concentraciones de gases inflamables, tóxicos o explosivos deben ser monitoreadas y controladas para garantizar la seguridad de los trabajadores (Tejeda y Mucha, 2022).

Software Ventsim

Ventsim está conformado por un conjunto de programas informáticos empleados en el sistema de ventilación de minas subterráneas. Estos programas simulan diversos datos relacionados con la ventilación de un modelo de túnel, como la presión, el flujo de aire, la temperatura, el radón, los gases, los incendios, los humos y otros aspectos. El propósito principal de llevar a cabo un estudio de ventilación en una mina es establecer la cantidad y calidad del aire presente requeridas para lograr un flujo adecuado. Tanto las condiciones operativas específicas como el método de detonación utilizado son elementos que influyen en la determinación de los flujos de aire necesarios.

Temperatura

La temperatura es una medida de la energía térmica presente en el ambiente y se expresa en grados Celsius (°C). Es un indicador importante para evaluar el confort térmico de los trabajadores y puede influir en la productividad y el bienestar laboral. (ISO, 2014)

Ventilación

La ventilación es esencial para mantener una atmósfera segura y habitable en una mina. Se utilizan sistemas de ventilación para introducir aire fresco y eliminar gases peligrosos, polvo y humedad. Los sistemas de ventilación pueden incluir ventiladores, ductos y puertas herméticas (Tejeda y Mucha, 2022).

Volumen de aire por trabajador

El volumen de aire por persona se refiere a la cantidad de aire fresco que se proporciona individualmente a cada persona en un espacio o área específica durante un periodo de

tiempo determinado, generalmente expresado en metros cúbicos o litros por minuto o por hora. El objetivo es asegurar que cada individuo cuente con suficiente aire fresco para respirar y mantener una adecuada oxigenación. (ACGIH, 2019)

CAPITULO III: HIPÓTESIS Y VARIABLES

4.1. Hipótesis

La optimización del diseño del sistema de ventilación permitirá incrementar la productividad de los trabajadores en el nivel 460 de la Cortada Esperanza, 2023.

4.2. Variables

3.2.1 Variables independientes

Diseño óptimo del sistema de ventilación.

3.2.2 Variables dependientes

Incremento de la productividad de los trabajadores.

4.3. Operacionalización de variables

Tabla 8*Operacionalización de variables*

Tipo de variable	Variable	Dimensión	Indicador	Técnica de investigación	Instrumento
Independiente	Diseño óptimo del sistema de ventilación	Requerimiento de aire en las labores mineras	Volumen de aire por trabajador	Modelamiento de flujo de aire	Ventsim Design
		Distribución del flujo de aire	Recirculación de aire viciado Presión	Simulaciones y modelamiento computacional	Ventsim Design
Dependiente	Incremento de la productividad de los trabajadores	Adecuadas condiciones de trabajo	Concentración de contaminantes	Simulaciones y modelamiento computacional	Medidor de gases Ventsim Design
			Temperatura del ambiente de trabajo	Observación Análisis de documentos	Termómetro digital
		Toneladas producidas por hombre guardia	$TM/HH/Gdia = \frac{\text{Cantidad de Toneladas rotas por Guardia}}{\text{Tiempo total de operación} \times \text{Número de trabajadores por Guardia}}$	Observación	Registro de producción por guardia Cronómetro

CAPITULO IV: MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Área de estudio

El área de estudio se centrará en la cortada Esperanza, específicamente en el nivel 460 de una mina subterránea ubicada en la región de Áncash, Perú. Esta área ha sido seleccionada debido a las condiciones actuales de ventilación y la necesidad de mejorar la eficiencia operativa y la seguridad laboral.

5.2. Diseño de investigación

Esta investigación emplea una metodología de enfoque cuantitativo, ya que se llevará a cabo un monitoreo y registro de la situación actual del sistema de ventilación en el nivel 460 de la cortada Esperanza.

El presente estudio se clasifica como una investigación de tipo descriptivo y no experimental. La metodología incluye la recolección de información documental y el uso del software de simulación VentSim para modelar los cambios en el diseño del sistema de ventilación. Mediante este enfoque, se pretende evaluar el impacto potencial de las mejoras, estableciendo una base tanto teórica como práctica para futuras aplicaciones.

5.3. Población y muestra

Población

La población de estudio incluye todos los elementos relevantes del entorno de una mina subterránea que afectan los requerimientos de aire fresco. Esto abarca a los colaboradores que operan en el nivel 460, los equipos utilizados en las labores mineras, las diferentes actividades y las fuentes de contaminación presentes. La mina subterránea en cuestión se encuentra en la región de Áncash, Perú, y su análisis se centra en asegurar condiciones adecuadas de ventilación.

Muestra

Dado que la investigación pretende abarcar la totalidad de los elementos involucrados en las operaciones del nivel 460 de la mina subterránea, se considerará toda la población descrita. En consecuencia, no se establecerá una muestra específica, sino que se evaluará de forma integral a todos los componentes y factores pertinentes.

5.4. Procedimiento, técnicas e instrumentos de recolección de datos

La metodología de trabajo se estructura en varias etapas para analizar y mejorar las condiciones de ventilación en la mina. Las actividades clave que se desarrollarán para cumplir con los objetivos de la investigación son las siguientes:

- Medición de parámetros de ventilación y ambiente laboral en la Cortada Esperanza.
- Cálculo y evaluación del requerimiento de aire fresco en el nivel 460.
- Simulación de condiciones de ventilación y ambiente en el software Ventsim Design.
- Optimización del diseño del sistema de ventilación que favorezcan el incremento de la productividad de los colaboradores basado en un principio de confort térmico y control de la concentración de agentes químicos.
- Evaluación de la optimización en el diseño del sistema de ventilación.
- Presentación de los resultados de la investigación.

Técnicas

Observación: Se empleó la observación sistemática para recopilar datos cuantitativos relacionados con la producción y las condiciones de ventilación en el nivel 460 de la mina.

Revisión de documentos: Se utilizó esta técnica para obtener información de fuentes existentes, incluyendo reportes técnicos, planos y otros documentos relevantes que proporcionen evidencia física sobre la zona de estudio.

Instrumentos

Para la recolección de datos se utilizó los siguientes instrumentos y herramientas:

- Cronómetro digital
- Anemómetro
- Medidor de gases
- Software de ventilación (Ventsim)
- Microsoft Excel
- Notas de campo

Procedimiento

Diagnóstico inicial

Para el diagnóstico inicial se siguió los siguientes pasos:

- Verificación y calibración de los instrumentos.
- Programación del día para la toma de muestras.
- Posicionamiento estratégico de los instrumentos en el área de estudio.
- Recolección de información inicial sobre ventilación, incluyendo flujo de aire, cantidad de personal, producción y planos de la mina.

Configuración del sistema de ventilación

El diseño del sistema de ventilación se realizó utilizando el software Ventsim.

Este proceso se basó en los datos recopilados durante el diagnóstico inicial para determinar el caudal de aire necesario.

Implementación

Se procedió a la implementación de los cambios en el diseño del sistema de ventilación, lo cual incluyó la instalación de ventiladores, conductos de aire y otros componentes necesarios para mejorar la circulación de aire en el nivel 460.

Mejora del sistema de ventilación

Finalmente, se optimizó el diseño del sistema de ventilación, enfocándose en el incremento de la productividad y la mejora en las condiciones de trabajo.

5.5. Análisis estadístico

Se empleó diversos programas estadísticos y de simulación para procesar los datos recopilados. En esta investigación, se utilizará Microsoft Excel para realizar cálculos, generar gráficos y gestionar la base de datos. Además, se utilizó el software Ventsim para simular y evaluar las condiciones de ventilación.

Procedimiento

Etapas de pre-campo

Recopilación de información: Obtención de datos preliminares del nivel 460, incluyendo detalles sobre el equipo y personal involucrado en las actividades.

Análisis inicial de la cantidad y calidad de aire: Evaluación de los niveles de aire requeridos y análisis de los gases y/o contaminantes, considerando tanto los producidos naturalmente por la mina como los resultantes de las voladuras.

Etapas de campo

Recolección de datos: Obtención de datos de ventilación del nivel 460 de la cortada Esperanza. Esto incluye información sobre ventiladores, extractores, sistemas de ventilación, chimeneas, personal presente y equipos utilizados.

Evaluación de Condiciones Ambientales: Realización de análisis detallados sobre los niveles de cantidad de aire y la concentración de gases en el área de estudio, incluyendo los producidos por la mina y las voladuras.

Etapas de post-campo

Evaluación y Simulación: Utilización de softwares como Ventsim y Excel para

evaluar los datos recolectados y simular posibles modificaciones en el sistema de ventilación.

CAPITULO V: RESULTADOS

5.1 Condiciones del ambiente laboral que afectan el incremento de la productividad de los trabajadores en el nivel 460 de la Cortada Esperanza

Los trabajos de campo realizados en la mina de estudio fueron desarrollados del 01 al 12 de enero del 2023 con la finalidad de obtener la siguiente información: velocidad del aire, condiciones ambientales; así como identificar y comprender los circuitos de ventilación. En base al análisis y evaluación en el software Ventsim Visual Avanzado, se proponen alternativas para la mejora del circuito de ventilación en la unidad minera.

5.1.1 Medición de parámetros de ventilación y ambiente laboral en la Cortada Esperanza

5.1.1.1 Puntos de medición

La mina consta de 8 niveles, los cuales representan el 80% de la producción total de la empresa minera. De acuerdo a ello, se tienen ubicadas cinco estaciones para el monitoreo de las condiciones de ventilación y ambiente de la unidad minera, donde tres de ellas son consideradas para la medición de entrada de aire, y las dos restantes para la medición de la salida del mismo, según se muestra en las Tablas 9, Tabla 10 y en la Figura 16.

Tabla 9

Descripción de los puntos de medición de entrada de aire en la unidad minera de estudio

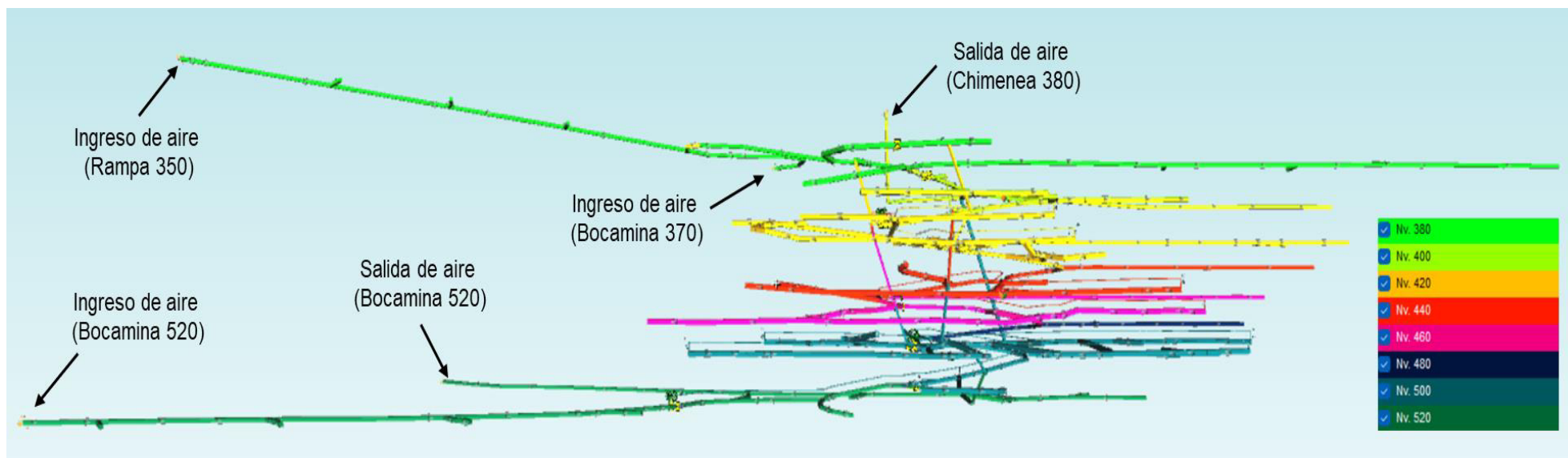
Estación	Ubicación	Labor
EVC-I-01	Nv.350	Rp.350
EVC-I-02	Nv.370	BC.370
EVC-I-03	Nv.520	BC.520

Tabla 10*Descripción de los puntos de medición de salida de aire en la unidad minera de estudio*

Estación	Ubicación	Labor
EVC-S-01	Superficie	CH.380
EVC-S-02	Superficie	BC.520B

Figura 16

Descripción de ingresos y salidas de aire del sistema de ventilación actual



5.1.1.2 Balance de caudal de aire

De acuerdo a la información brindada por el área de planeamiento, el aforo de los caudales de la unidad minera reportó un caudal total de ingreso de 4,182 m³/min o 147,702 cfm, y un caudal total de salida de 4,376 m³/min o 154,541 cfm. Obteniéndose un desbalance de 6,839 cfm, que representa el 4.6% adicional del caudal de entrada. El resumen se muestra en la Tabla 11 y Tabla 12.

Tabla 11

Resumen de datos obtenidos en campo - Ingresos de aire Mina

Estación	Ubicación	Labor	Velocidad (m/min)	Caudal (m ³ /min)	Caudal (CFM)
EVC-I-01	Nv.350	Rp.350	98	1,434	50,629
EVC-I-02	Nv.370	BC.370	112	1,686	59,531
EVC-I-03	Nv.520	BC.520	75	1,063	37,542
Total ingreso de aire				4,182	147,702

Tabla 12

Resumen de datos obtenidos en campo - Salidas de aire Mina

Estación	Ubicación	Labor	Velocidad (m/min)	Caudal (m ³ /min)	Caudal (CFM)
EVC-S-01	Superficie	CH.380	154	2,361	83,387
EVC-S-02	Superficie	BC.520B	130	2,015	71,154
Total salida de aire viciado				4,376	154,541

De acuerdo a la información suministrada por el área de Planeamiento, se procede a distribuir el personal, los equipos Diésel y el consumo de explosivo por circuitos. Se busca con esto, tener presente la cantidad de aire requerido para cada circuito y optimizar el consumo de aire.

5.1.2 Análisis de calidad de aire en las estaciones de medición de la salida de aire viciado

Con el objetivo de cuantificar la calidad de aire respirado por los colaboradores de los diferentes niveles de trabajo de la unidad minera, el equipo de levantamiento de ventilación encontró los siguientes resultados de concentración de los principales agentes químicos en el aire viciado de mina.

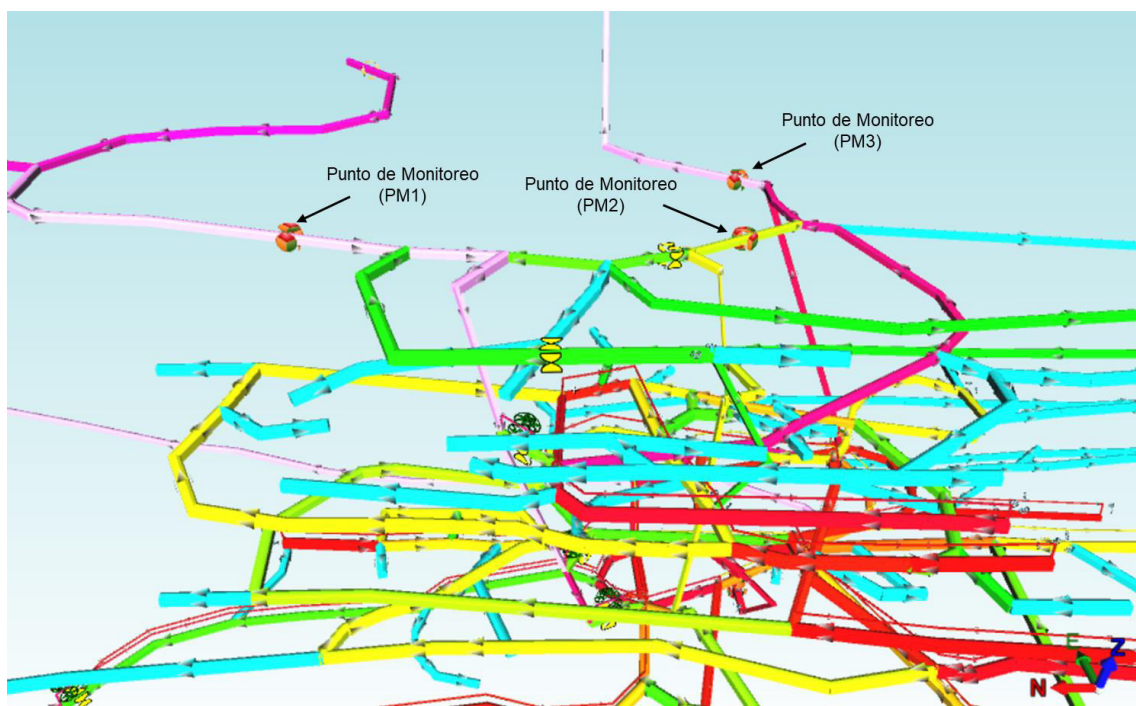
El método de muestreo seguido está definido por el estándar UNI EN 1540, el cual involucra un radio de medición de 0.3 m alrededor del rostro de los operadores, en dirección de la fuente de aspiración en las estaciones de salida del aire viciado.

Los datos recolectados serán fuente causal para la evaluación de los agentes químicos contaminantes en el ambiente de trabajo, tiempo de reingreso posterior a un proceso de avance en los frentes de trabajo y evaluación de la productividad del proceso.

La ubicación de los puntos de monitoreo (PM) se muestran en la Figura 17.

Figura 17

Ubicación de Puntos de Monitoreo (PM) en el sistema de ventilación actual



Punto de medición 1 (PM1)

Las concentraciones registradas en el punto de monitoreo 1, muestran el siguiente comportamiento en el tiempo según indica las Figuras 18, 19 y 20, luego de un proceso de avance de 4 frentes.

Figura 18

Medición de concentración de CO (ppm) PM1

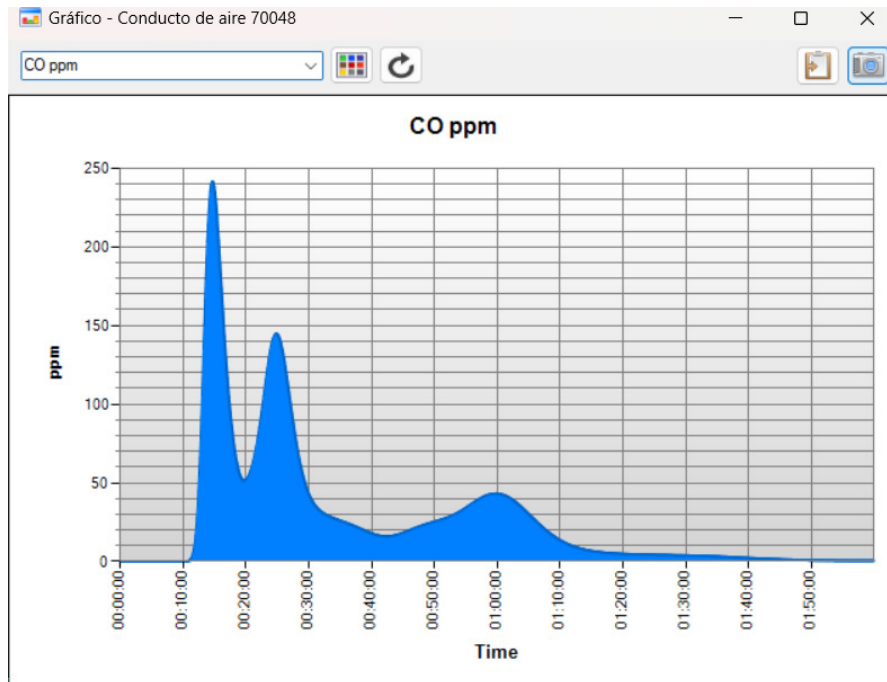
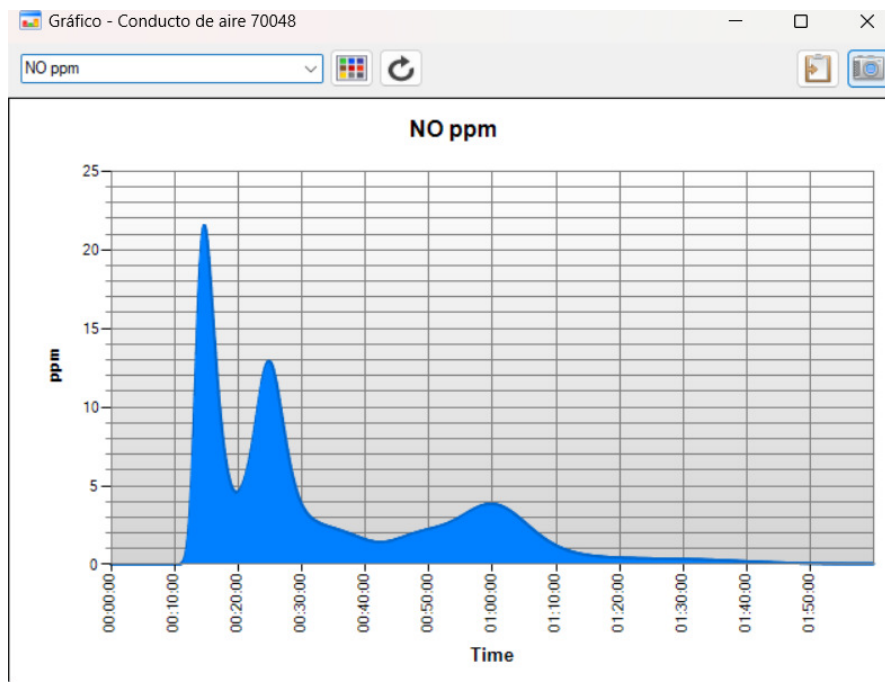
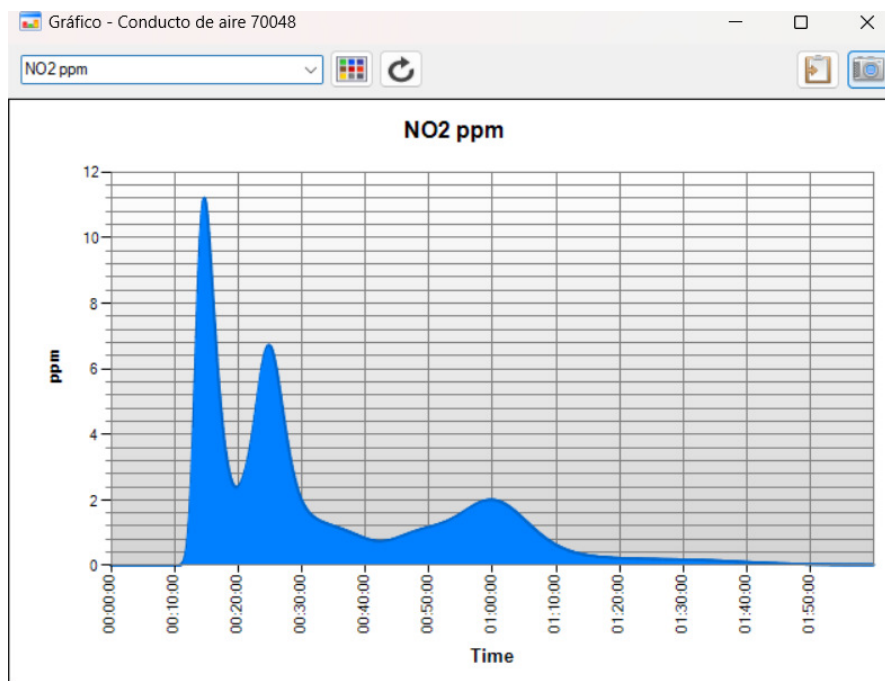


Figura 19*Medición de concentración de NO (ppm) PM1***Figura 20***Medición de concentración de NO₂ (ppm) PM1*

De acuerdo a los resultados mostrados en los reportes del Ventsim, se evidencia que, para el CO, NO y NO₂, las concentraciones en intervalos de 65, 00 y 14 minutos respectivamente se encuentran considerablemente superior a los límites de exposición

ocupacional. Por lo cual, para que el personal pueda retomar sus actividades tendrían que registrar valores aceptables en concordancia a la normativa peruana.

Punto de medición 2 (PM2)

Las concentraciones registradas en el punto de monitoreo 2, muestran el siguiente comportamiento en el tiempo según indica las Figuras 21, 22 y 23, luego de un proceso de avance de 4 frentes.

Figura 21

Medición de concentración de CO (ppm) PM2

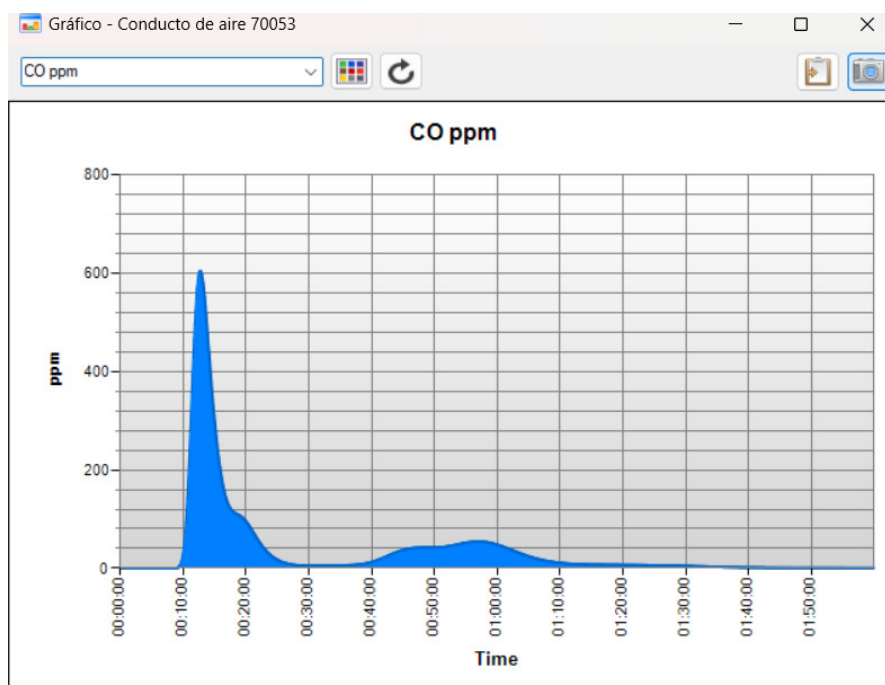
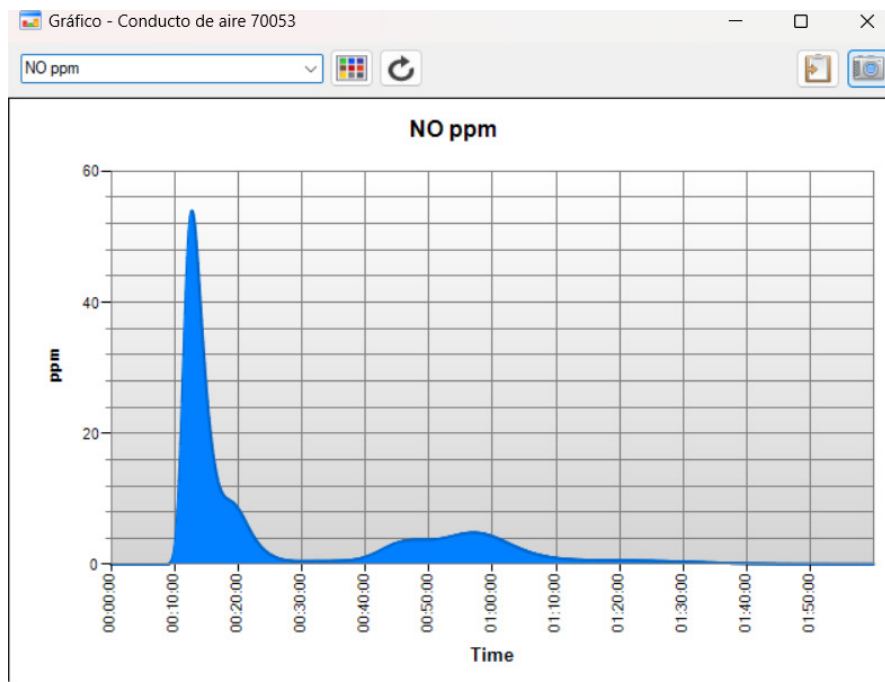
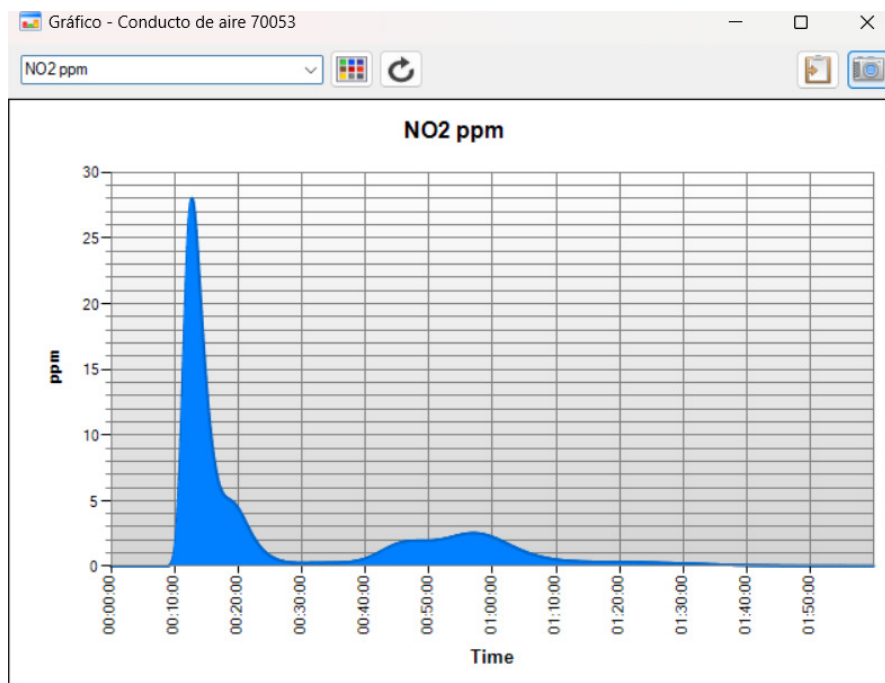


Figura 22*Medición de concentración de NO (ppm) PM2***Figura 23***Medición de concentración de NO₂ (ppm) PM2*

De acuerdo a los resultados mostrados en los reportes del Ventsim, se evidencia que, para el CO, NO y NO₂, las concentraciones en intervalos de 54, 03 y 08 minutos respectivamente se encuentran considerablemente superior a los límites de exposición

ocupacional. Por lo cual, para que el personal pueda retomar sus actividades tendrían que registrar valores aceptables en concordancia a la normativa peruana.

Punto de medición 3 (PM3)

Las concentraciones registradas en el punto de monitoreo 3, muestran el siguiente comportamiento en el tiempo según indica las Figuras 24, 25 y 26, luego de un proceso de avance de 4 frentes.

Figura 24
Medición de concentración de CO (ppm) PM3

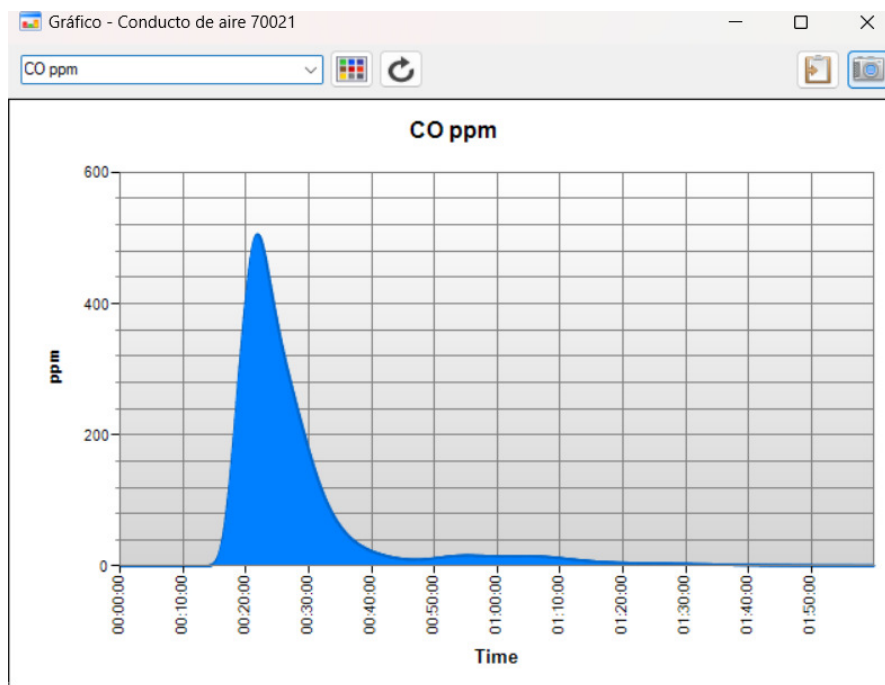
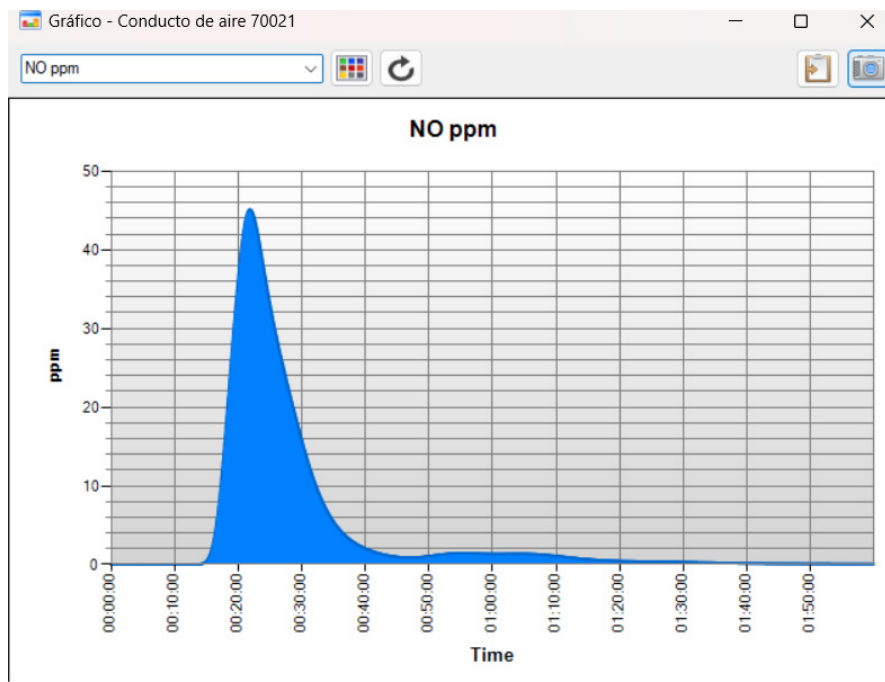
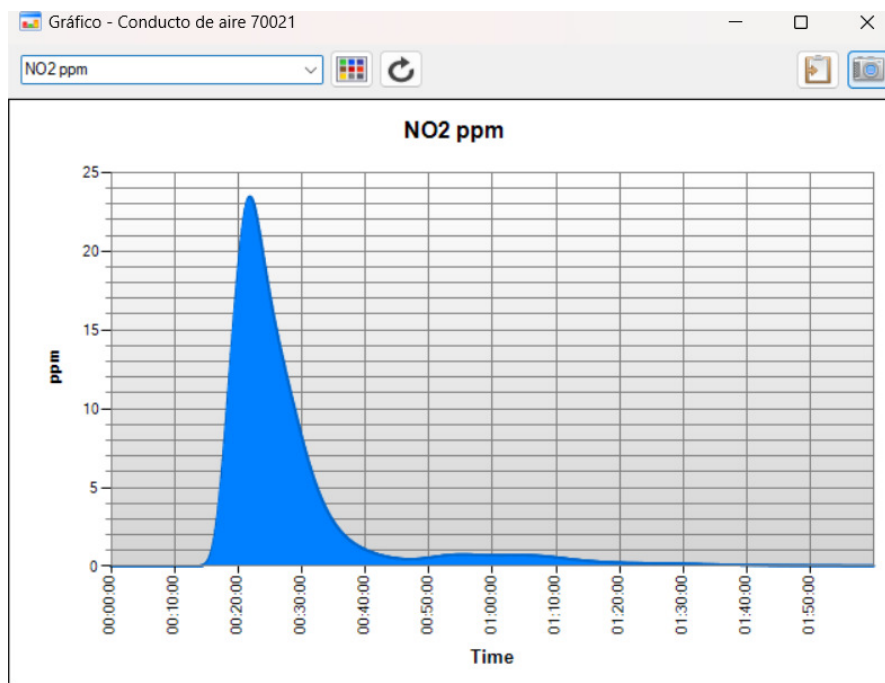


Figura 25*Medición de concentración de NO (ppm) PM3***Figura 26***Medición de concentración de NO₂ (ppm) PM3*

De acuerdo a los resultados mostrados en los reportes del Ventsim, se evidencia que, para el CO, NO y NO₂, las concentraciones en intervalos de 24, 10 y 15 minutos respectivamente se encuentran considerablemente superior a los límites de exposición

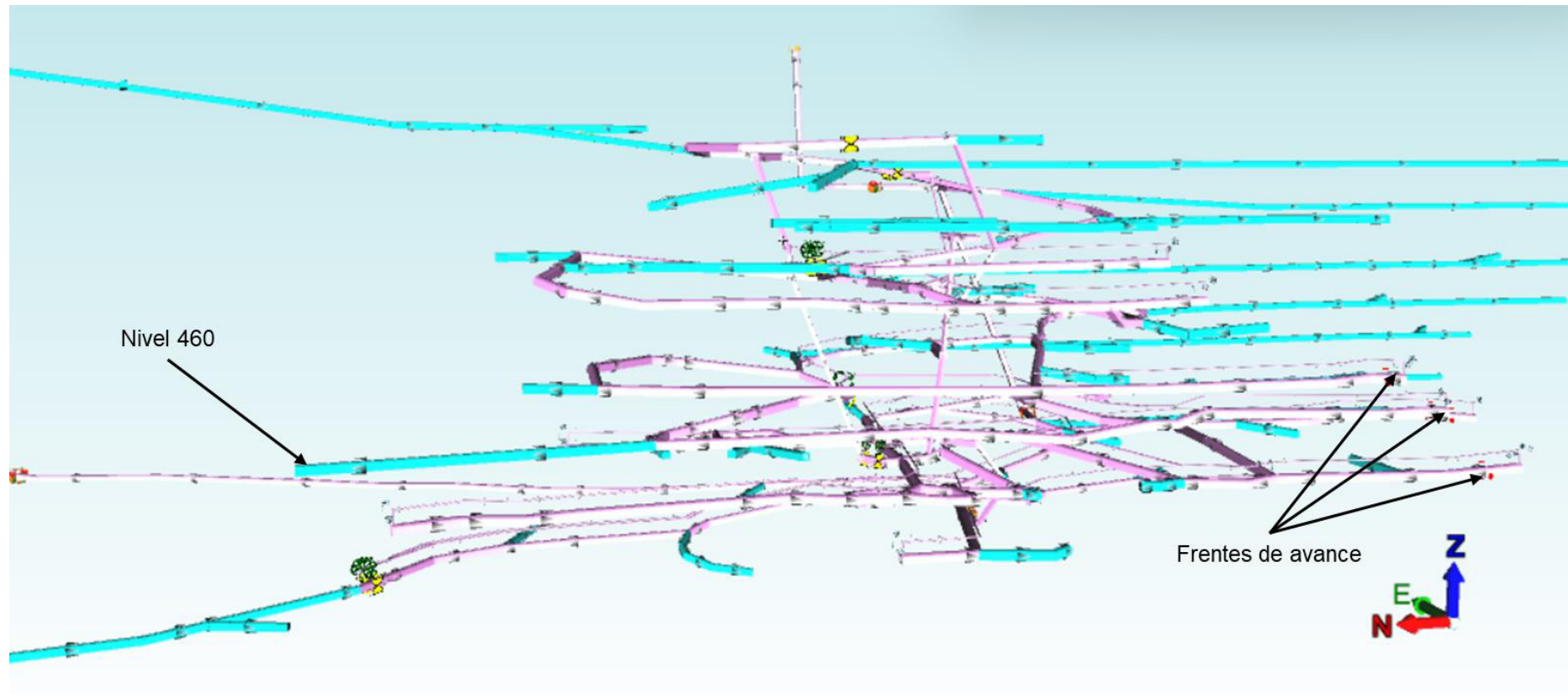
ocupacional. Por lo cual, para que el personal pueda retomar sus actividades tendrían que registrar valores aceptables en concordancia a la normativa peruana.

5.1.3 Evaluación de la calidad de aire en el sistema de ventilación actual

De los valores registrados en los puntos de monitoreo de gases, luego del proceso de avance de los 4 frentes en simultáneo se identifica una elevada concentración de CO, NO y NO₂. Por lo cual se realiza la simulación para validar la trayectoria del gas viciado, verificar las potenciales zonas afectadas; así como definir el tiempo de ingreso para reinicio del siguiente ciclo de minado, según se muestra en la Figura 27.

Figura 27

Simulación dinámica de contaminantes – Sistema de ventilación actual

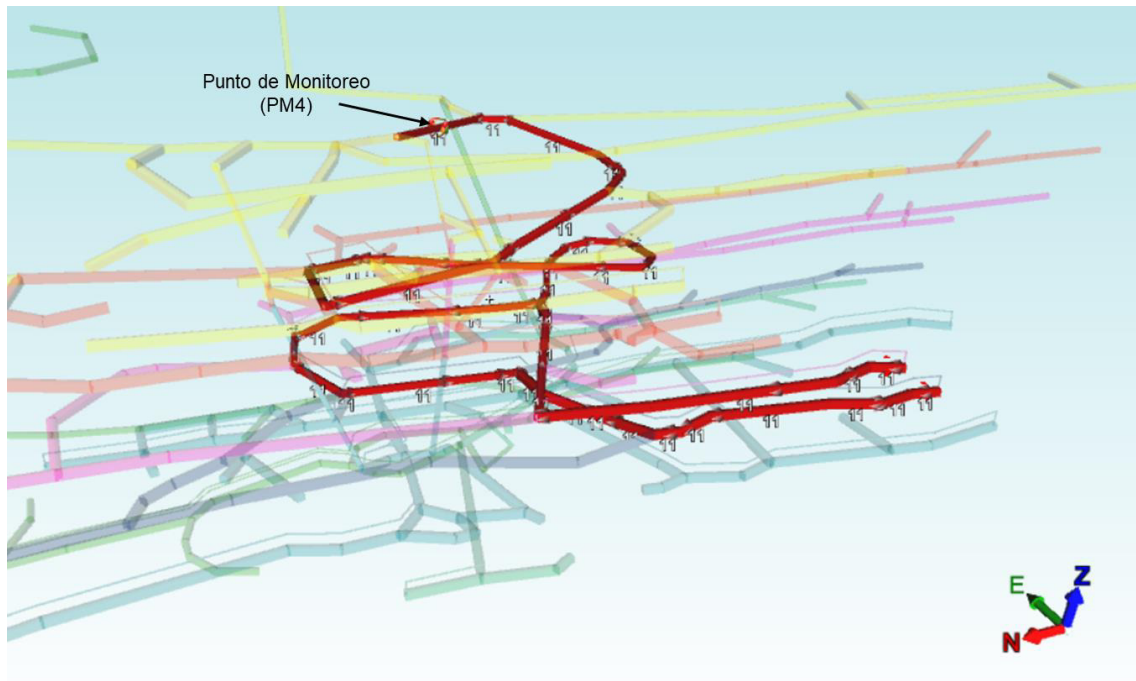


De la simulación mostrada en la Figura 27, se evidencia que el aire viciado circula y contamina las labores de acceso tales como galerías y rampas, lo cual inhabilita el ingreso de personal para retomar sus actividades productivas. Asimismo, se evidencia que el aire viciado recircula por los ventiladores que inyectan aire hacia los frentes de trabajo, lo cual representa una importante oportunidad de mejora.

Se está considerando un punto de monitoreo (PM4) ubicado en el ingreso a la rampa principal que da acceso hacia los frentes de avance para validar las condiciones previo al ingreso, según se muestra la Figura 28.

Figura 28

Acceso a los frentes de trabajo Nivel 460



A continuación, se presentan los niveles de concentraciones registradas en el PM4 en las Figuras 29, 30 y 31 que registran los gases de CO, NO y NO₂ respectivamente.

Figura 29
Medición de concentración de CO (ppm) PM4

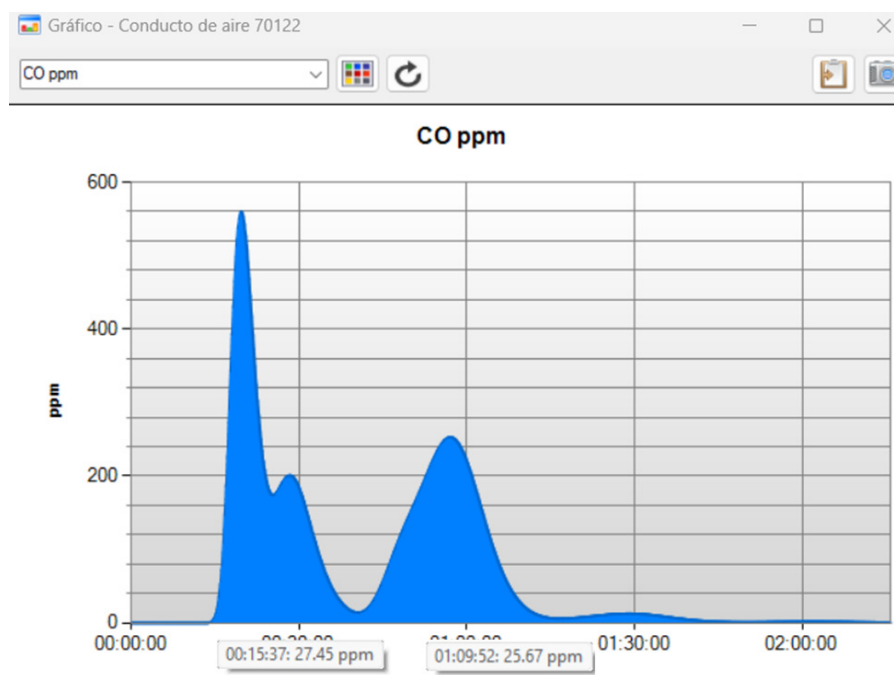


Figura 30
Medición de concentración de NO (ppm) PM4

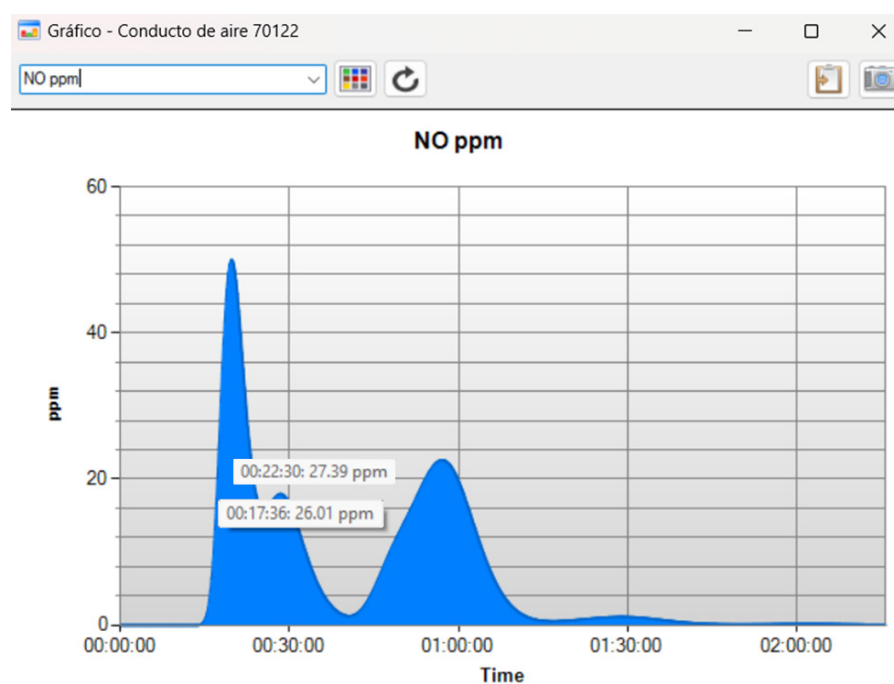
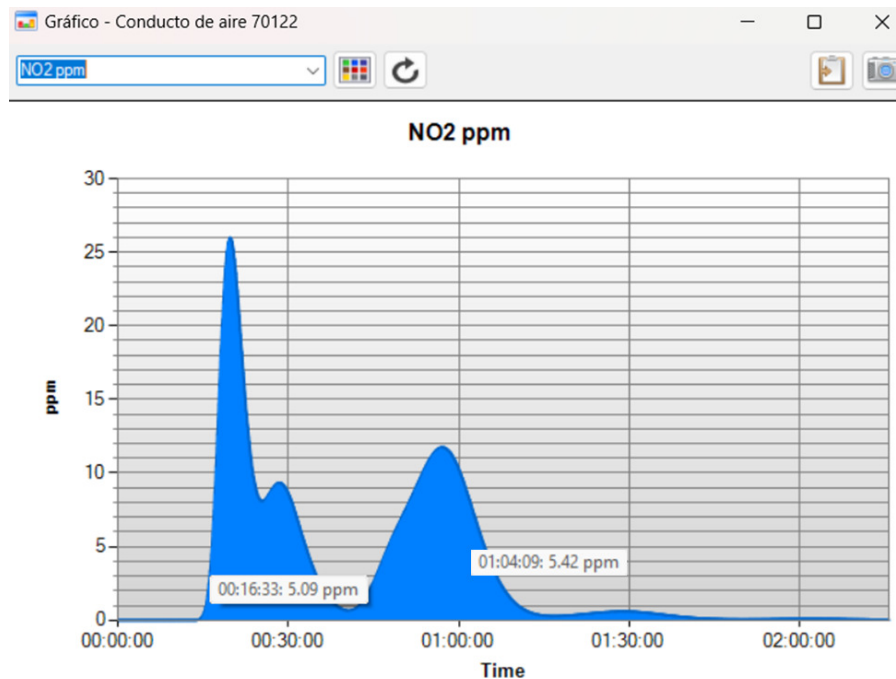


Figura 31
Medición de concentración de NO₂ (ppm) PM4



De acuerdo a los resultados mostrados en los reportes del Ventsim, se evidencia que, para el CO, NO y NO₂, las concentraciones en los intervalos de 54, 05 y 48 minutos respectivamente se encuentran considerablemente superior a los límites de exposición ocupacional.

En consecuencia, el periodo de disipación de aire y ventilación de manera que se brinden condiciones apropiadas de trabajo ascendería a 54 minutos, en el cual, el PM4 comienza a registrar concentraciones menores a los Límites Máximos Permisibles (LMP).

5.1.3 Modelamiento del sistema de ventilación

5.1.3.1 Calibración del modelo en software Ventsim

El área de Planeamiento proporciona el modelo de las labores de la unidad minera en formato Datamine. Esta información se utilizó para actualizar y validar el modelo, basándose en los sólidos según la topografía minera. Después de construir los ejes centrales e importarlos en el software Ventsim como archivos DXF, se procedió a la calibración del modelo.

La calibración requiere datos específicos del sitio de la mina, como el factor de fricción "K", altitud, temperatura, densidad, presión, entre otros, que son esenciales para asegurar que el modelo esté preparado para realizar simulaciones y diseños realistas. Además, el flujo de aire a través de las redes de ventilación diseñadas debe registrar valores que sean muy cercanos a los observados en el campo.

Para implementar y calibrar el modelo de ventilación de la unidad minera en estudio, se ingresaron los siguientes parámetros operativos en Ventsim Visual™ Avanzado, como se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13*Entrada de condiciones operativas en software Ventsim*

Medio Ambiente	Parámetros
Aire densidad de flujo compresible	0.93 kg/m ³
Ajuste temperatura superficie	Si
Calor específico de la roca	790.0 J/kgC
Conductividad térmica de la roca	2.00 W/mC
Densidad de la roca	2.700 kg/m ³
Densidad del aire en la red	0.88 kg/m ³
Difusividad térmica de la roca	0.938 m ² /s 10 ⁻⁶
Edad del conducto de aire	5,000 años
Elevación superficial de la rejilla	2,591.9 m
Fracción de la humedad de la roca	0.6
Gradiente geotérmico	1.2 C/100m
Presión barométrica en la superficie	22.8 en Hg
Superficie atmosférica	6.4 C/1000m
Superficie de referencia de humedad	39.7 R
Superficie de referencia elevación	2,234.1 m
Temperatura de la roca superficial	20.0 C
Temperatura del bulbo húmedo	10.0 C
Temperatura del bulbo seco	14.0 C

5.1.3.2 Grado de calibración

Para hacer posible que las velocidades del flujo del aire correspondan a lo registrado en campo, se hizo uso de diferentes medios de regulación faltantes como puertas, reguladores, obstrucciones, cortinas, etc. Estas características fueron introducidas al programa de simulación Ventsim, configurando en sus herramientas de edición.

Tras la creación del modelo con todos los detalles, se procedió a la verificación del flujo de aire comparando los resultados del simulador con las mediciones realizadas en la mina.

Esta validación se realizó utilizando la siguiente ecuación:

$$Variacion (\%) = \frac{\sum Flujos Campo - \sum Flujos Simulado}{\sum Flujos Campo} \times 100 \quad (5.1)$$

Teóricamente, si la variación es inferior al 10%, se considera que el modelo es similar al circuito de ventilación presente en la mina. Esta ecuación se utiliza para verificar tanto la magnitud como la dirección de los caudales medidos. Las diferencias pueden atribuirse a errores en el uso de equipos como anemómetros, movimiento de los equipos, puertas o reguladores de flujo, cambios en la temperatura ambiental y otros disturbios temporales que afectan las mediciones durante el mapeo de caudales. A continuación, se presenta la correlación entre las entradas y salidas de aire según el modelo Ventsim y los datos obtenidos en el campo en las Tablas 14 y 15, respectivamente.

Tabla 14

Correlación entrada de aire modelo Ventsim de acuerdo al modelo de campo

INGRESO DE AIRE					
Estación	Ubicación	Labor	Caudal (cfm)		Distrib. %
			Campo	Ventsim	
EVC-I-01	Nv.350	Rp.350	50,629	51,721	-2.2%
EVC-I-02	Nv.370	BC.370	59,531	59,482	0.1%
EVC-I-03	Nv.520	BC.520	37,542	39,333	-4.8%
TOTAL INGRESO DE AIRE FRESCO			147,702	150,537	-1.9%

Tabla 15

Correlación salida de aire modelo Ventsim de acuerdo al modelo de campo

SALIDA DE AIRE					
Estación	Ubicación	Labor	Caudal (cfm)		Distrib. %
			Campo	Ventsim	
EVC-S-01	Superficie	CH.380	83,387	81,422	2.4%
EVC-S-02	Superficie	BC.520B	71,154	68,641	3.5%
TOTAL SALIDA DE AIRE VICIADO			154,541	150,063	2.9%

5.1.3.3 Determinación del factor de fricción

Para determinar el factor de fricción “K”, se realizaron trabajos de campo utilizando la fórmula de Atkinson y comparando los resultados con la ecuación de Colebrook, ajustando estos cálculos a las condiciones actuales de la mina, que son muy sensibles y variables. Además, se compararon estos valores con los establecidos en las tablas de Hartman. La ecuación modificada de Colebrook es la siguiente:

$$1/\sqrt{\lambda} = 1.74 - 2\log_{10}(2e/\lambda)$$

Donde:

$$\lambda = 6.67 K, (\text{lb} \cdot \text{min}^2 / \text{pie}^4)$$

$$e = \text{Rugosidad (m)} / \text{Diámetro hidráulico de la labor (m)}$$

Es importante considerar que el programa Ventsim Visual™ calcula la resistencia de la labor basándose en el Factor de fricción “K”, que se selecciona según la rugosidad de la labor. También es necesario seleccionar el tipo de regulador existente, como puertas de ventilación, rellenos, orificios, muros de concreto, entre otros. De acuerdo con el inventario de ventiladores disponible en la unidad minera estudiada y validado mediante

trabajos de campo, se obtuvieron los valores del factor de fricción para las diferentes labores, los cuales se presentan en la Tabla 16.

Tabla 16

Factor de fricción en labores de desarrollo y preparación

Ítems	Tipo de labor	Factor de fricción K (Kg/m3)
1	GL-380	0.016465
2	GL-400	0.014523
3	RP-350	0.013645
4	RP-370	0.012982
5	RP-500	0.013677
6	BP-420	0.013564
7	BP-440	0.013456
8	BP-460	0.013687
9	BP-480	0.013625
10	BP-500	0.013345
11	GL-520	0.015624
12	Chimeneas	0.016245
13	Raise Borer	0.006292
14	Ductos Flexibles (mangas)	0.004437

5.2 Requerimiento de aire fresco que permita el incremento de la productividad de los trabajadores en el nivel 460 de la Cortada Esperanza

5.2.1 Cálculo del requerimiento de aire fresco total de mina

Para el cálculo del caudal necesario para diluir los gases producidos por la Voladura, se tuvo el sustento técnico del “Decreto Supremo 024-2016-EM y su modificatoria Decreto Supremo N° 023-2017-EM del estado peruano”, donde las labores tendrán una velocidad

del aire mínimo de 25 m/min (debido al uso de Emulsión) con una sección promedio de 14 m².

El cálculo para definir el requerimiento de Aire que necesita la mina ha considerado un total de:

- Personal: 92 personas/guardia, siendo su requerimiento de 4.2 m³/min por cada persona.
- Equipos Diésel: 15 equipos operativos a combustión interna Diésel, que suman una potencia de motor desarrollada de 1,159 HP, siendo su requerimiento de 3m³/min por HP.
- Dilución de Gases de Voladura: 250 kg de explosivo por guardia.

El detalle del cálculo de requerimiento de aire por personal de toda la mina se muestra en la Tabla 17 y el cálculo de requerimiento de aire por equipos petroleros se muestra en la Tabla 18.

Requerimiento caudal de aire por personal

Tabla 17

Cálculo de caudal de aire por personal de toda la unidad minera

Empresa	Área	Guardia A (Dia)	Caudal (m3/min)	Caudal (cfm)	Distrib. (%)
COMPAÑÍA	Geología	3	12.60	444.96	3.26%
	Mina	8	33.60	1186.56	8.70%
	Seguridad	3	12.60	444.96	3.26%
	Planeamiento	4	16.80	593.28	4.35%
	Ventilación	2	8.40	296.64	2.17%
	Mantenimiento	3	12.60	444.96	3.26%
URQU SAC	Operaciones + servicio	40	168.00	5,932.80	43.48%
	Mantenimiento Mecánico	10	42.00	1483.20	10.87%

KUSIMAYO	Mantenimiento Eléctrico	4	16.80	593.28	4.35%
MULTICOS	Operadores de	12	50.40	1779.84	13.04%
AILOR	maquinarias				
	Supervisión	3	12.60	444.96	3.26%
TOTAL		92	386.40	13,645	100%

Requerimiento caudal de aire por equipos petroleros

Tabla 18

Cálculo de caudal de aire por equipos petroleros de toda la unidad minera

Ítem	Empresa	Equipo	Cant.	Potencia Nominal (HP)	Rend. (%)	Potencia efectiva	DM (%)	FU (%)	Subtotal HP	Caudal (m3/min)	Caudal (cfm)	Distrib. (%)
1	COMPAÑÍA	SCOOP	1	215	80%	172	87%	69%	112	336	11,856	7%
2	COMPAÑÍA	SCOOP	1	215	80%	172	91%	75%	117	352	12,414	7%
3	COMPAÑÍA	SCOOP	1	279	80%	223	91%	73%	148	444	15,680	9%
4	COMPAÑÍA	SCOOP	1	279	80%	223	91%	73%	148	444	15,680	9%
5	COMPAÑÍA	JUMBO	1	77	80%	62	91%	73%	41	123	4,335	3%
6	COMPAÑÍA	JUMBO	1	94	80%	75	86%	31%	20	60	2,124	1%
7	COMPAÑÍA	JUMBO	1	94	80%	75	88%	63%	42	125	4,417	3%
8	Muklticosailor	Volquete	1	440	80%	352	80%	50%	141	423	14,930	9%
9	Muklticosailor	Volquete	1	440	80%	352	80%	50%	141	423	14,930	9%
10	Muklticosailor	Volquete	1	441	80%	353	80%	50%	141	423	14,930	9%
11	COMPAÑÍA	Camioneta	1	145	80%	116	80%	40%	37	111	3,933	2%
12	COMPAÑÍA	Camioneta	1	145	80%	116	80%	40%	37	111	3,933	2%
13	Muklticosailor	Camión	1	143	80%	114	75%	40%	34	103	3,638	2%
TOTAL			13	3,164		2,532			1,159	3,477	122,800	100%

Requerimiento caudal de aire por consumo de madera

Actualmente, la mina opera de manera totalmente mecanizada, por lo que el análisis no incluye la necesidad de flujo de aire relacionado con el consumo de madera.

Requerimiento caudal de aire por temperatura

Las temperaturas máximas registradas fueron inferiores a 23°C, principalmente en áreas de tránsito y operativas de los equipos. Se concluye que, aunque la mina presenta un potencial problema de estrés térmico, no se considera necesario incluir un requerimiento de aire basado en la temperatura para el cálculo.

Requerimiento caudal de aire por fugas

Según la normativa peruana, esto corresponde al 15% de la suma de los requerimientos para trabajadores (Q_{tr}), equipos diésel (Q_{eq}) y temperatura (Q_{te}), tal como se presenta en la Tabla 19.

Tabla 19

Cálculo de caudal de aire por fugas de toda la unidad minera

Q_{tr} (cfm)	Q_{te} (cfm)	Q_{eq} (cfm)	$Q_{fu} = 15\% (Q_{tr}+Q_{te}+Q_{eq}, \text{ cfm})$
13,645	0	122,800	20,467

Requerimiento total de caudal

El requerimiento total de caudal se obtiene sumando los requerimientos para el personal, los equipos diésel, la temperatura y las fugas, como se muestra en la Tabla 20.

Tabla 20*Cálculo de caudal de aire de toda la unidad minera*

Distribución Requerimientos	m3/min	cfm
QTr: N° Trabajadores (92 trabajadores/gd)	386.40	13,645
QTe: Temperatura en labores de trabajo	0	0
QEq: Equipos con motor petrolero (15 equipos)	3,477	122,800
QFu: Caudal requerido por fugas	579.60	20,467
Caudal Requerido QTr+QTe+QEq+QFu	4,443	156,913

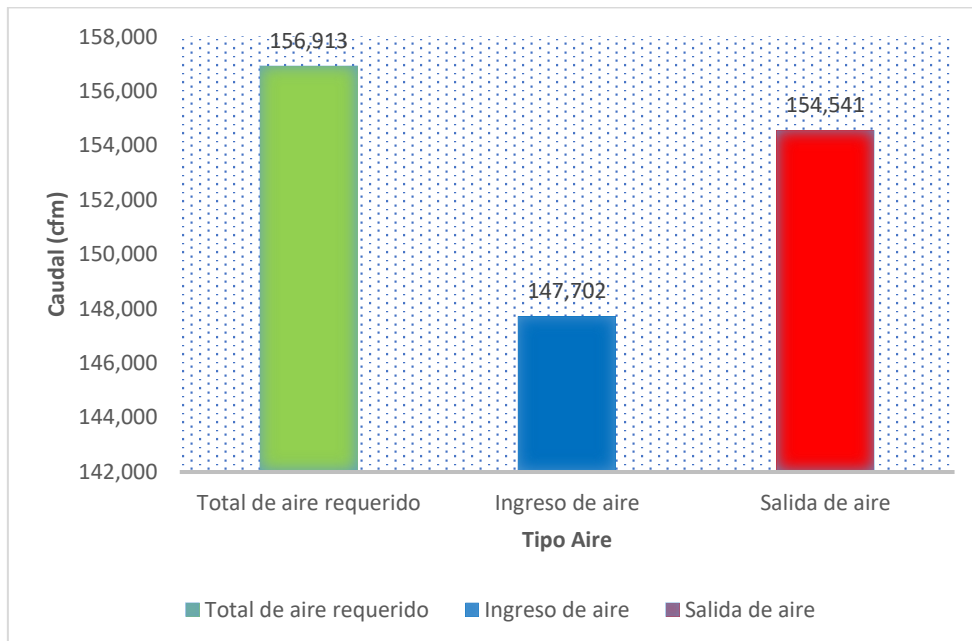
Se determina que el caudal global requerido actualmente (QT0) es de 156,913 cfm.

Del cálculo de requerimiento de aire de toda la mina, se presenta el balance actual de aire considerando los HP efectivos de los equipos, caudal requerido para personal, Caudal por temperatura y caudal por fuga, según se muestra en la Tabla 21 y Figura 32.

Tabla 21*Balance actual mina*

Distribución de Aire	m3/min	cfm
Total de aire requerido	4,443	156,913
Ingreso de aire	4,182	147,702
Salida de aire	4,376	154,541
Cobertura (%)		94.13%
Déficit (cfm)	-261	-9,211

Figura 32
Balance de caudal de aire actual



Del balance de caudal de aire, se determinó que actualmente a nivel global de mina se cuenta con un déficit de 9,211 cfm; es decir, se tiene una cobertura del 94.13%. Lo cual representa una oportunidad de mejora para brindar condiciones de suministro de aire adecuado y no poner en riesgo la integridad del personal.

5.2.2 Cálculo del requerimiento de aire fresco Nivel 460

El enfoque de estudio para la evaluación del incremento de productividad de proceso es el Nivel 460. Por lo cual, se realiza el cálculo del caudal necesario para diluir los gases producidos por el avance en el frente de trabajo.

Para el cálculo se están considerando el caudal requerido por los trabajadores, equipos diésel y fugas, de los cuales el detalle de los cálculos de trabajadores y fugas se muestra en las Tablas 22 y 26 respectivamente.

Requerimiento caudal de aire por personal del Nivel 460

Tabla 22

Cálculo de caudal de aire por personal del Nivel 460

Puesto de trabajo	Guardia A (Dia)	Caudal (m3/min)	Caudal (cfm)	Distrib. (%)
Operario	2	8.4	296.6	28.6%
Ayudante	3	12.6	445.0	42.8%
Supervisor	1	4.2	148.3	14.3%
Seguridad	1	4.2	148.3	14.3%
Total	7	29.4	1038,2	100%

Se determina que el caudal requerido por los trabajadores (QTr) para el avance del Nivel 460 es de 1038,2 cfm.

Requerimiento caudal de aire por equipos petroleros del Nivel 460

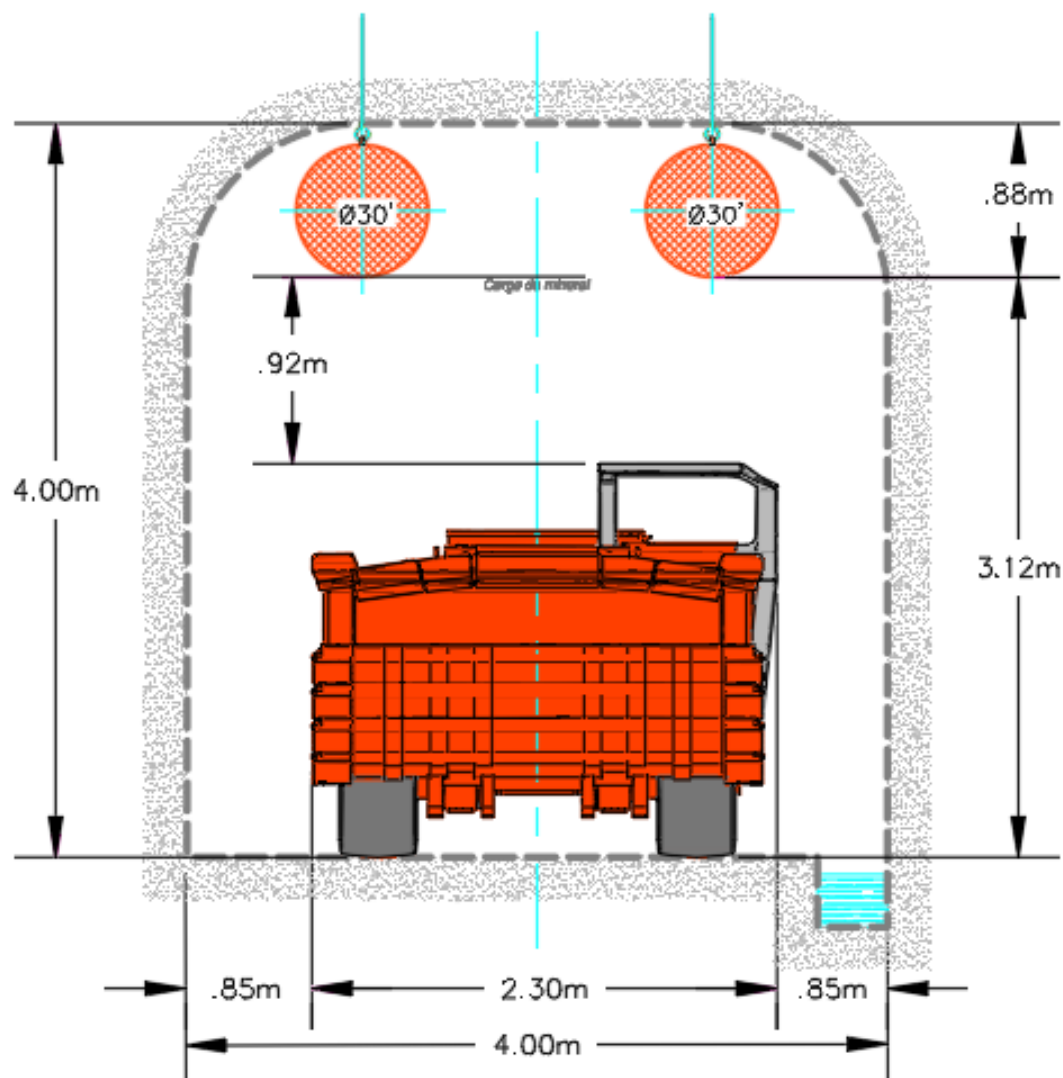
De los recursos con los que cuenta la unidad minera, se destinan 01 Scoop, 01 Jumbo y 01 volquete para realizar el avance programado. Es necesario precisar que los equipos antes mencionados no actúan simultáneamente en la labor de avance, sino que cada uno tiene una función secuencial del proceso anterior que realiza cada maquinaria. Los cálculos independientes son mostrados en la Tabla 23, 24 y 25.

Tabla 23

Cálculo de caudal de aire por Scoop LH 307 - Sandvik

Equipo	Cant.	Potencia Nominal (HP)	Rend. (%)	Poten cia efecti	DM (%)	FU (%)	Subtotal HP	Caudal (m3/min)	Caudal (cfm)
SCOOP LH 307	1	215	80%	172	100%	100%	172	516	18,222

Asimismo, se presenta una sección típica del scoop en la sección de avance, según se muestra en la Figura 33.

Figura 33*Sección típica Scoop LH 307 - Sandvik***Tabla 24***Cálculo de caudal de aire por BOOMER 104 – Atlas Copco*

Equipo	Cant.	Potencia Nominal (HP)	Rend. (%)	Potencia efectiva	DM (%)	FU (%)	Subtotal HP	Caudal (m3/min)	Caudal (cfm)
BOOMER 104	1	94	80%	75	100%	100%	75	225	7,946

Asimismo, se presenta una sección típica del jumbo en la sección de avance, según se muestra en la Figura 34.

Figura 34
Sección típica Jumbo BOOMER 104 – Atlas Copco

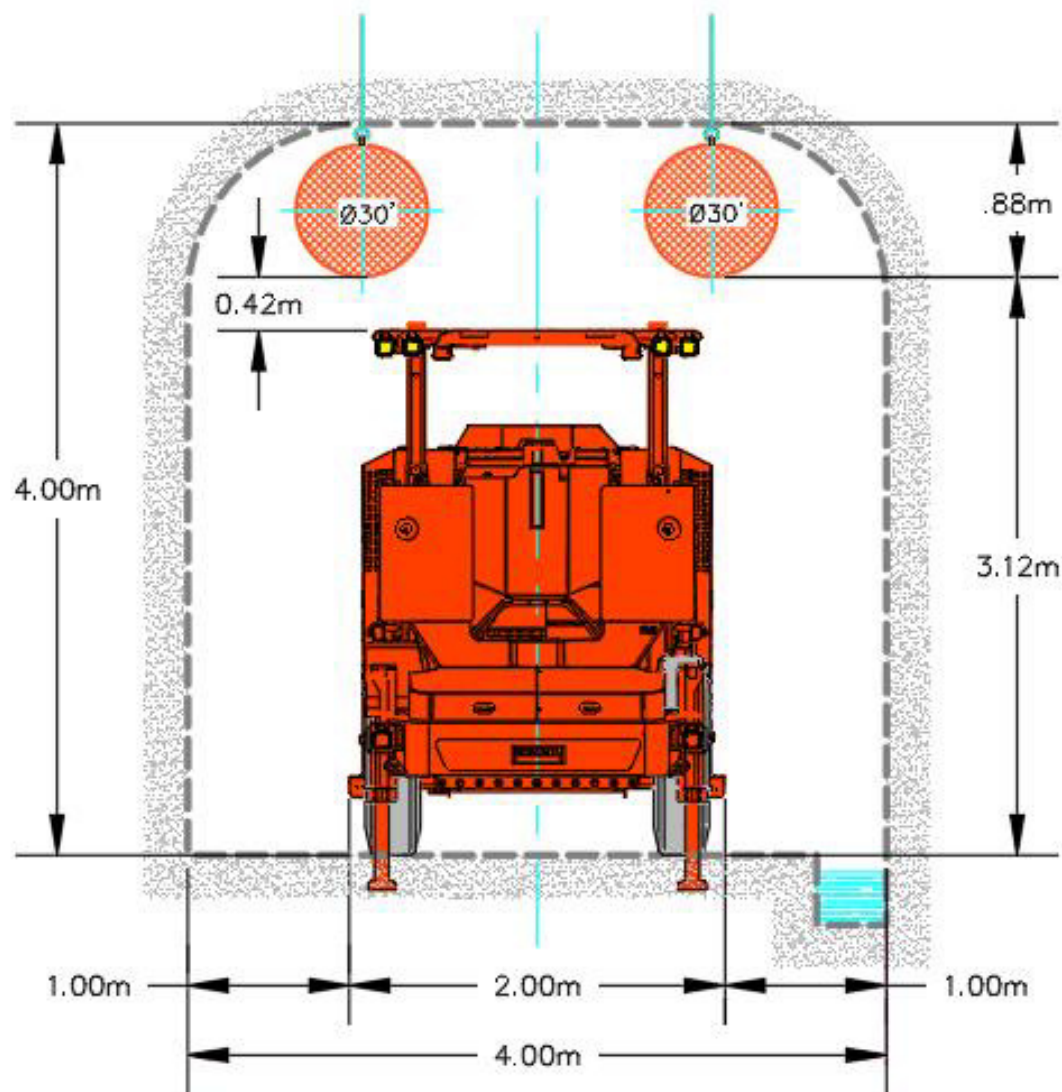
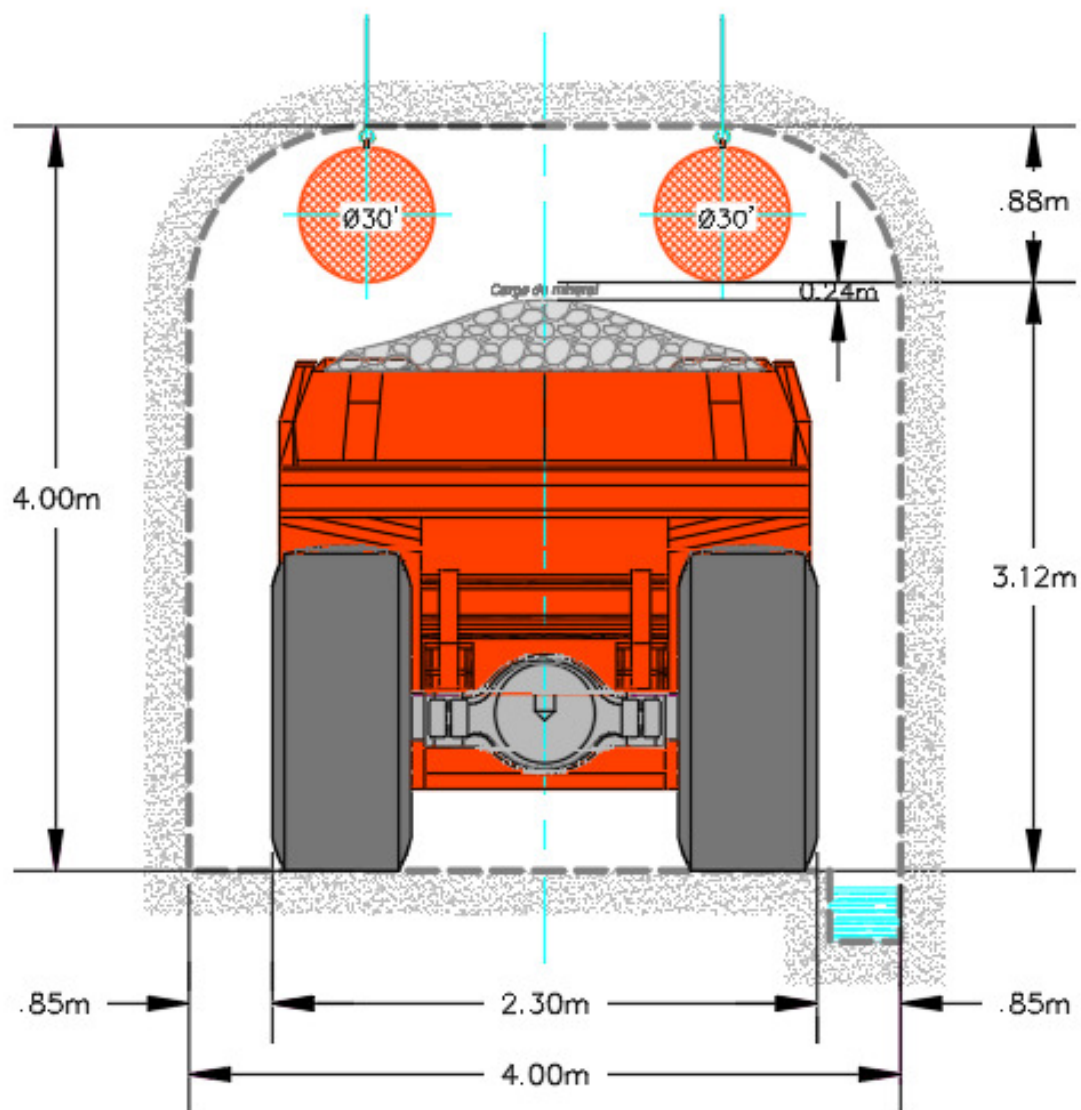


Tabla 25
Caudal de aire por Haul Trucks TH 315 – Sandvik

Equipo	Cant.	Potencia Nominal (HP)	Rend. (%)	Potencia efectiva	DM (%)	FU (%)	Subtotal HP	Caudal (m3/min)	Caudal (cfm)
TH 315	1	440	80%	352	100%	100%	352	1056	37,292

Asimismo, se presenta una sección típica del volquete en la sección de avance, según se muestra en la Figura 35.

Figura 35
Sección típica volquete TH 315 – Sandvik



De los equipos analizados, se verifica que el volquete TH 315 demanda mayor cantidad de aire con 37,292 cfm; sin embargo, el carguío de material volado será realizado fuera del frente de trabajo. Por lo cual, la demanda de aire por equipos en el Frente de trabajo será de 18,222 cfm que corresponde al uso del scoop.

Requerimiento caudal de aire por fugas

Tabla 26

Caudal aire por fugas Nivel 460

QTr (cfm)	QTe (cfm)	QEq (cfm)	QFu = 15% (QTr+QTe+QEq, cfm)
1,038	0	18,222	2,889

Se determina que el caudal requerido debido a fugas (QFu) para el avance del Nivel 460 es de 2,889 cfm.

Requerimiento de caudal Nivel 460

El caudal mínimo requerido para garantizar un abastecimiento de aire adecuado en el frente de avance del Nivel 460, que viene representado por el requerimiento por personal, equipos Diésel, por Temperatura y por fugas, se detalla en la Tabla 27.

Tabla 27

Caudal aire requerido Nivel 460

Distribución Requerimientos	m3/min	cfm
QTr: N° Trabajadores	29.40	1,038
QTe: Temperatura en labores de trabajo	0	0
QEq: Equipos con motor petrolero	516.00	18,222
QFu: Caudal requerido por fugas	81.20	2,867
Caudal Requerido QTr+QTe+QEq+QFu	627.20	22,149

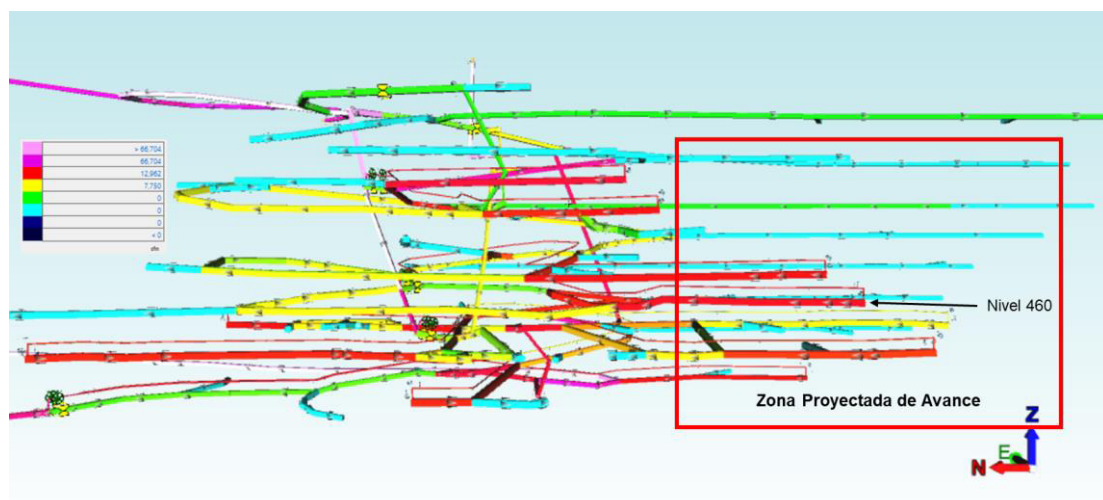
Se determina que el caudal requerido para el Nivel 460 (QT0) durante las operaciones de avance en los frentes es de 22,149 cfm.

Evaluando la cantidad de aire actual en el frente de trabajo correspondiente al Nivel 460 que asciende aproximadamente a 21,082 cfm y el requerimiento de aire de 22,149 cfm calculado previamente, se determina un déficit de 1,067 cfm. Por lo cual, se requiere aumentar el caudal de aire para satisfacer adecuadamente el requerimiento.

5.3 Cambios en el diseño del sistema de ventilación que incrementará la productividad de los trabajadores en el nivel 460 de la Cortada Esperanza

Debido a la necesidad de la unidad minera por seguir produciendo en los frentes de avance programados, y con la finalidad de aumentar la productividad del proceso mediante la reducción del tiempo de reingreso a los frentes para iniciar el siguiente ciclo de minado y brindar un ambiente de trabajo seguro para los trabajadores, se desarrolló mejoras al sistema de ventilación actual que permitirá evacuar el aire viciado en menos tiempo y evitando la recirculación de aire viciado. Asimismo, se tiene planificado una expansión al sur como se muestra en la Figura 36.

Figura 36
Zona proyectada de avance y/o expansión

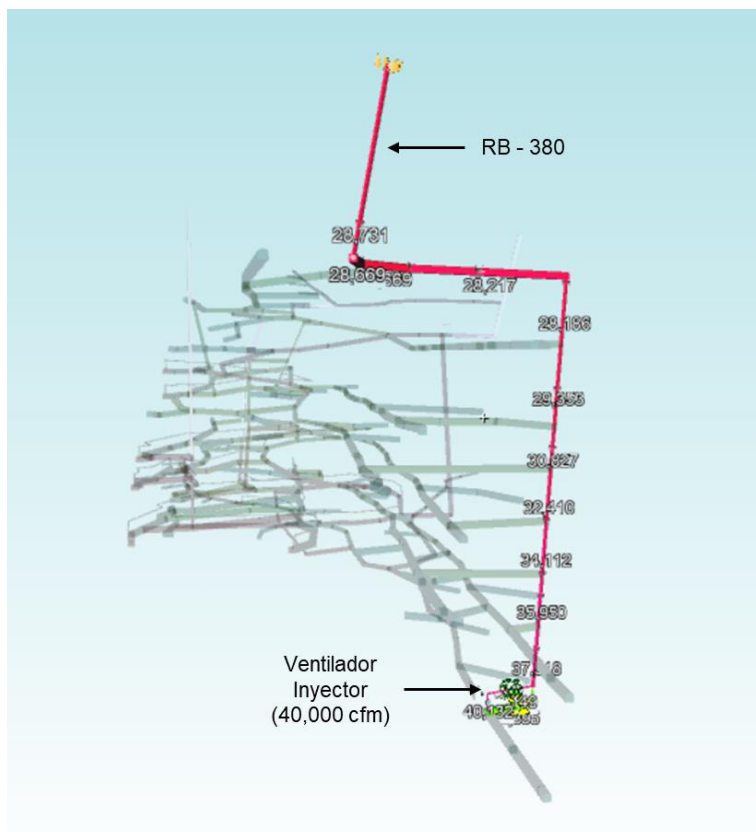


A continuación, se detallan los cambios en el diseño del sistema de ventilación:

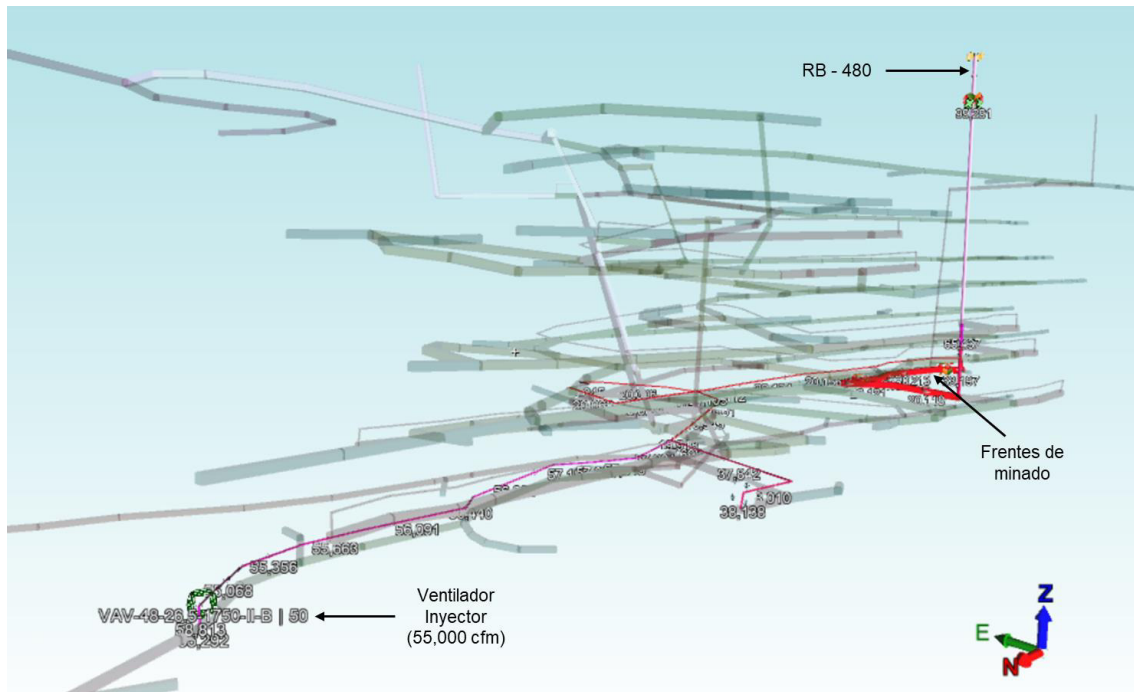
- a) Para la entrada de aire fresco, se construirá un Raise Borer (RB-380) con un diámetro de 1.8 m desde la superficie hasta su conexión con el Nivel 380. Desde allí, el Raise Borer se extenderá hasta el Nivel 520, conectando todos los niveles mediante galerías. Además, en la base del Nivel 520 se instalará un ventilador inyector con una capacidad de 40,000 cfm, que suministrará directamente el flujo de aire al Nivel 460 para cumplir con los requisitos de ventilación del frente de avance, como se muestra en la Figura 37.

Figura 37

Ingreso de aire fresco chimenea RB-380



- b) Para la extracción del aire contaminado, se instalará un ventilador TOMOCORP con una capacidad de 95,000 cfm en la parte superior de una chimenea de 3x3 metros de sección. Este ventilador recogerá el aire viciado de los niveles inferiores

Figura 39*Aumento de capacidad de ventilador inyector Nivel 520*

- d) Para abastecer aire fresco a los frentes de minado, se debe aumentar la capacidad del ventilador inyector existente de 40,000 a 50,000 cfm que se encuentra en la base de la chimenea que conecta con el Nivel 460, que mediante el sistema de ventilación forzada a través de mangas de ventilación suministra adecuada cantidad de aire al frente de trabajo y posteriormente el aire viciado sea evacuado por un Raise Borer (RB-480) construido para tal fin sin comprometer instalaciones de acceso, según se muestra en la Figura 40.

Se ha requerido para el direccionamiento y dosificación de aire el uso de reguladores tales como puertas de ventilación, orificio y/o reguladores.

A continuación, se presenta el informe del modelado calibrado del sistema de ventilación utilizando el software Ventsim Visual™ Avanzado, detallado en la Tabla 28.

Tabla 28

Resumen de resultados del sistema de ventilación optimizado

Resumen de la red del sistema	Resultados
Flujo de aire compresible	Si
La presión de ventilación natural	Si
Todos los conductos de aire	7,504
Actual etapa conductos	644
Segmentos de etapa actual	301
Longitud total	12,781.3 m
Caudal de aire total de admisión	207,846 cfm
Caudal de aire total de escape	209,322 cfm
Flujo de masa total	94.84 kg/s
Resistencia de la mina (sin tubo)	0.03780 Ns^2/m^8
Resistencia de la mina (incluyendo el conducto)	0.39693 Ns^2/m^8

5.3.2 Resultados del sistema de ventilación optimizado

5.3.2.1 Evaluación de la cantidad de aire en el sistema de ventilación optimizado

Implementando las mejoras al sistema de ventilación existente y manteniendo el mismo requerimiento de flujo de aire, se verifica que se tiene un superávit a nivel global de mina de 50,933 cfm; es decir, se tiene una cobertura del 132.5%. Esto representa que se brinda suficiente cantidad de aire a nivel global de mina y se cuenta con suficiente cobertura

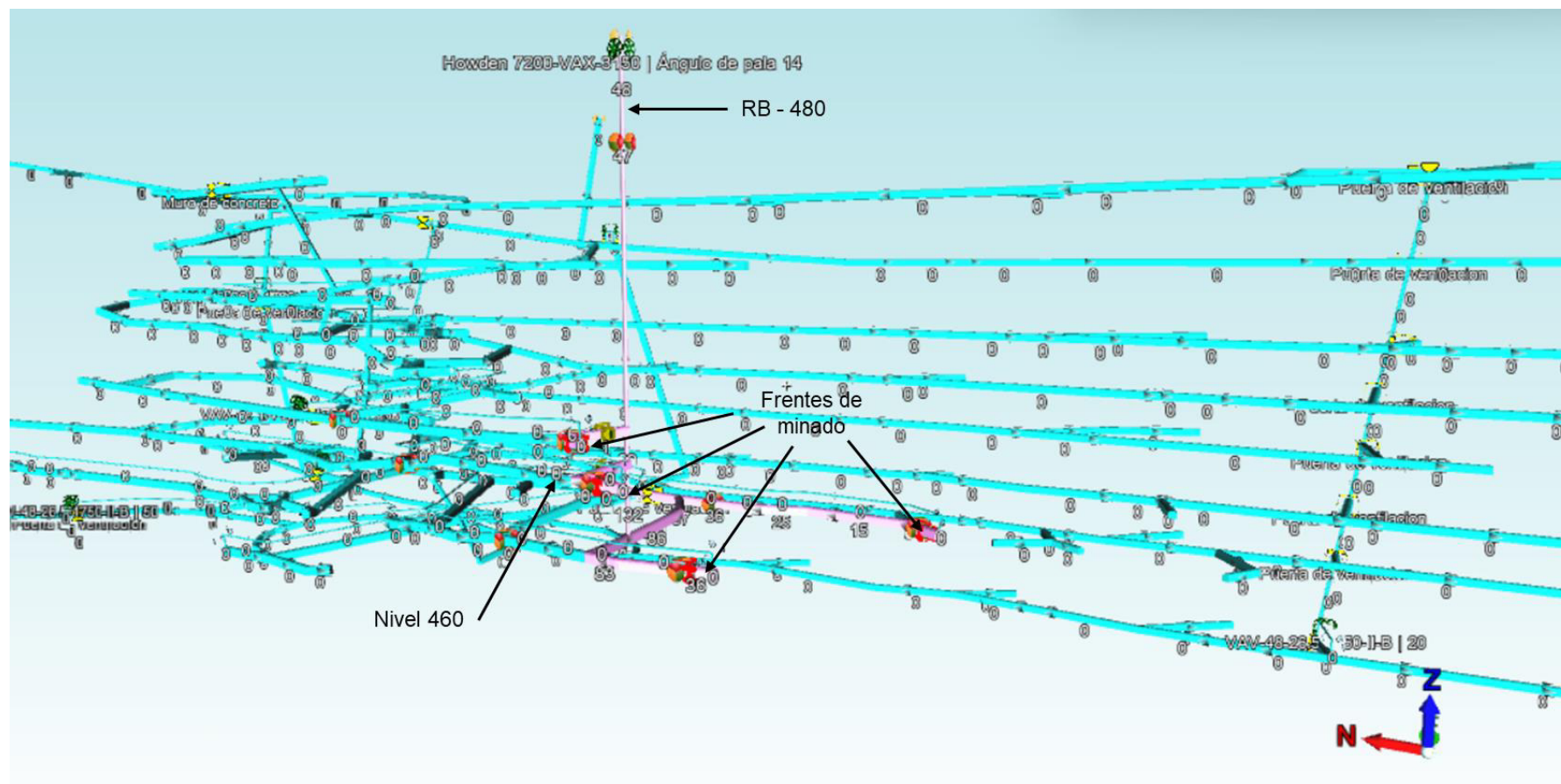
para la ampliación de equipos ante posibles modificaciones en la programación de minado y/o labores propias de la profundización brindando condiciones apropiadas de trabajo al personal involucrado.

Evalutando la cantidad de aire en el frente de trabajo del Nivel 460, tiene un caudal de aproximadamente 26,000 cfm según se muestra en la Figura 42, y considerando el mismo requerimiento en el frente, se determina un superávit de 3,860 cfm. Esto es un indicativo de que está llegando suficiente cantidad de aire al frente de avance y además se cuenta con caudal excedente para abordar contingencias tales como fugas debido al incorrecto hermetizado en la instalación de los ventiladores, turbulencia debido a instalaciones que impidan la salida efectiva de aire, etc.

5.3.2.2 Evaluación de la calidad de aire en el diseño óptimo del sistema de ventilación

Se realiza la simulación del gas viciado producto del avance simultáneo de los 4 frentes para monitorear los niveles registrados de las concentraciones en los puntos de acceso a la labor y definir el tiempo de ingreso en condiciones apropiadas de trabajo para el frente de trabajo correspondiente al Nivel 460, según se muestra en la Figura 43.

Figura 43
Simulación dinámica de contaminantes – Sistema de ventilación optimizado

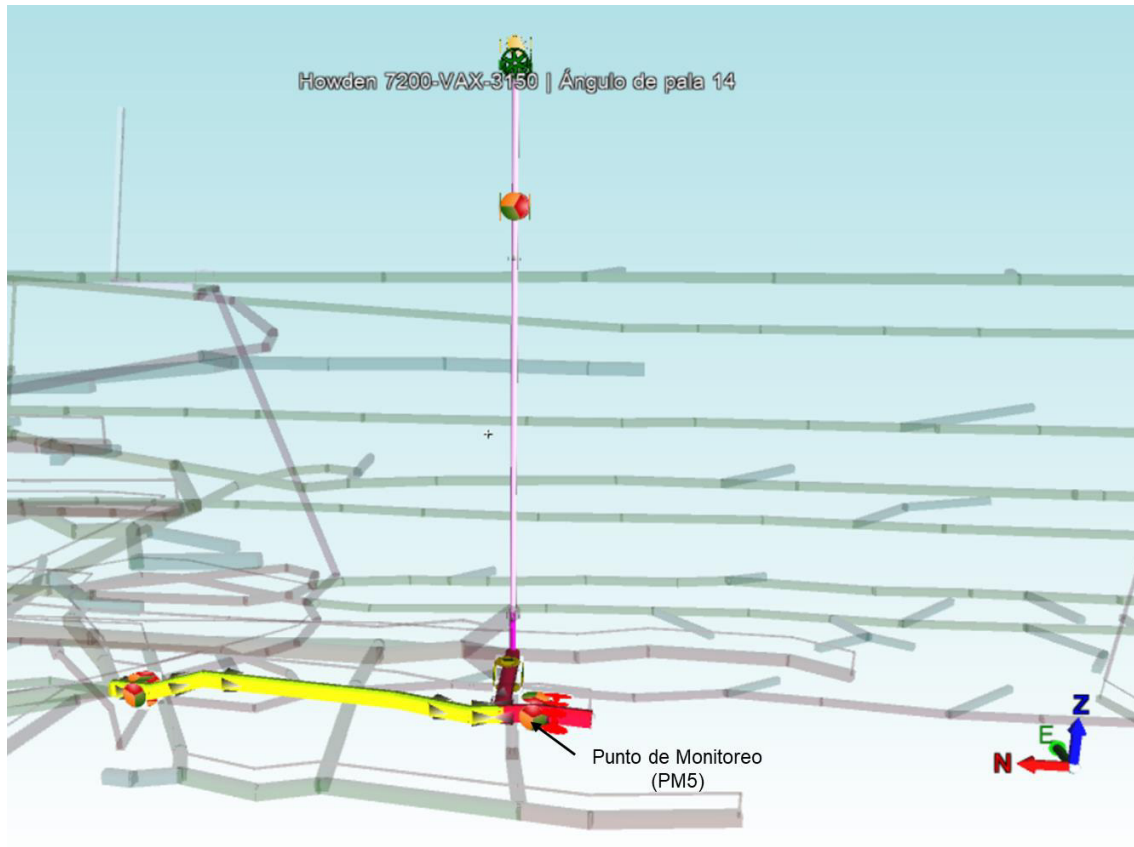


De la simulación mostrada en la Figura 46, se evidencia que el aire viciado producto del avance de los 4 frentes es transportado directamente hacia superficie a través del Raise Borer (RB-480) sin tener contacto con otra infraestructura.

Se está considerando un punto de monitoreo (PM5) ubicado en el frente de avance del Nivel 460 para verificar las condiciones previo al ingreso, según se muestra la Figura 44.

Figura 44

Medición de contaminantes en Punto de Monitoreo (PM5)



A continuación, se presentan los niveles de concentraciones registradas en el PM5 en las Figuras 45, 46 y 47 que registran los gases de CO, NO y NO₂ respectivamente.

Figura 45
Medición de concentración de CO (ppm) PM5

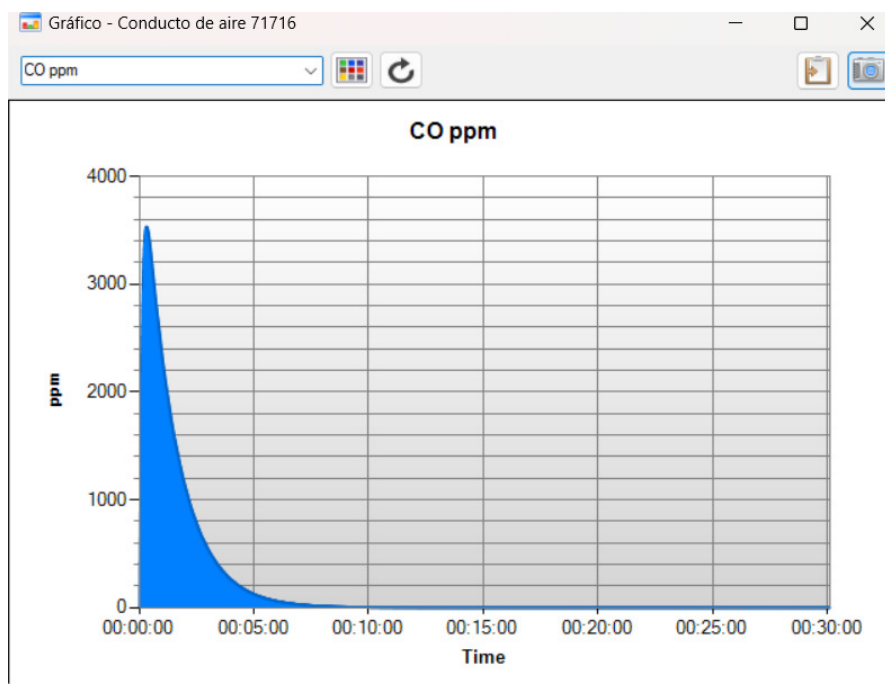


Figura 46
Medición de concentración de NO (ppm) PM5

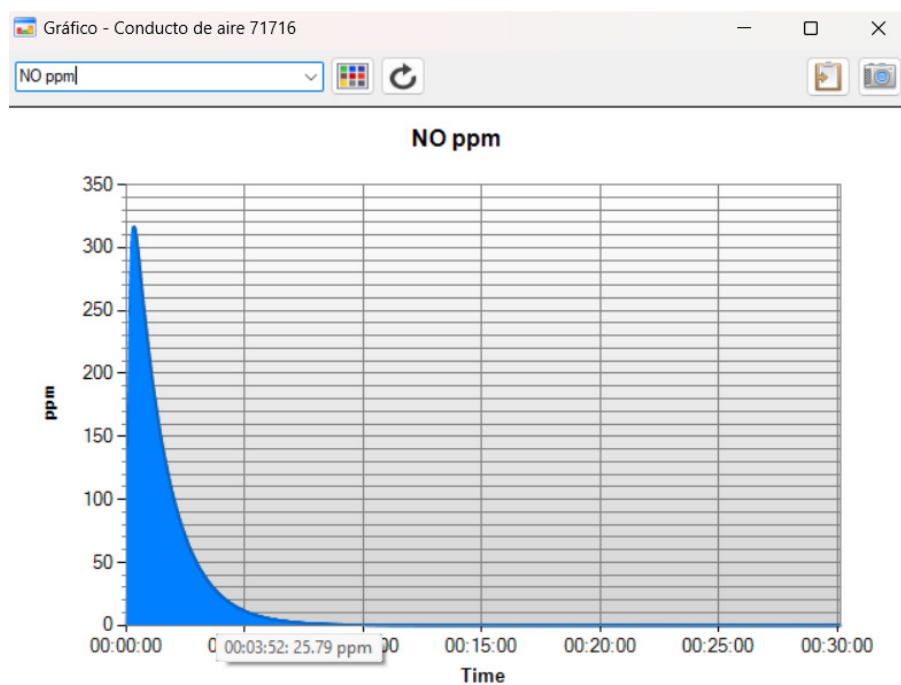
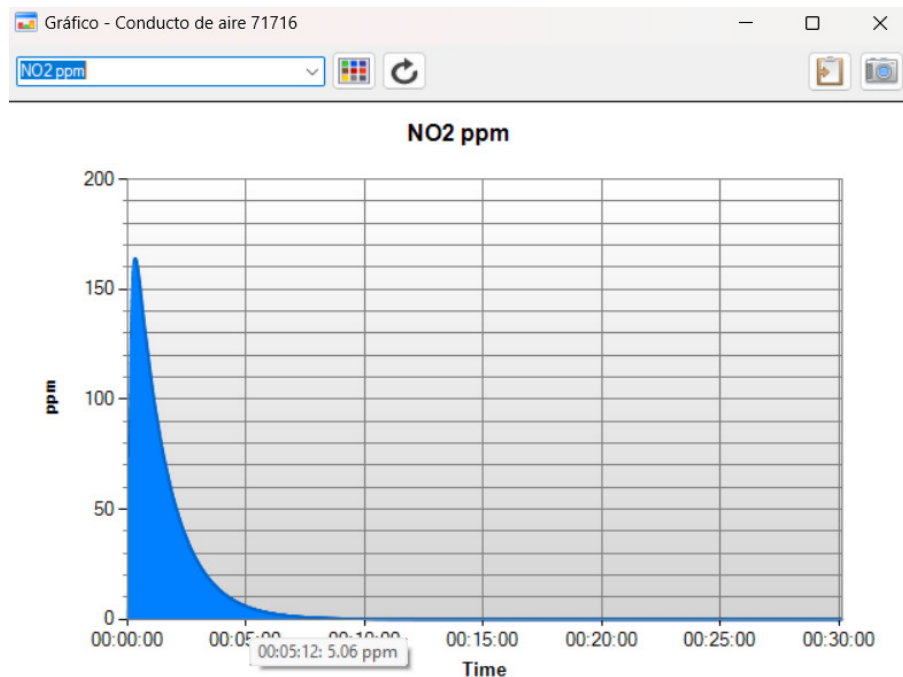


Figura 47*Medición de concentración de NO₂ (ppm) PM5*

De acuerdo a los resultados mostrados en los reportes del Ventsim, se evidencia que, para el CO, NO y NO₂, las concentraciones en intervalos de 10, 04 y 05 minutos respectivamente se encuentran considerablemente superior a los límites de exposición ocupacional.

En consecuencia, el periodo de disipación de aire y ventilación de manera que se brinden condiciones apropiadas de trabajo sería a partir de los 10 minutos, en el cual, el PM5 comienza a registrar concentraciones menores a los Límites Máximos Permisibles (LMP).

5.3.3 Análisis de la influencia de la mejora en el sistema de ventilación

5.3.3.1 Mejora en la seguridad de los trabajadores

La implementación de las mejoras al sistema de ventilación actual permitirá aumentar el caudal de aire disponible, elevando la cobertura de 94.13% a 132.5% en términos de aire fresco. En el frente de minado del Nivel 460, la cobertura pasará de 95.92% a 117.4%.

Estas mejoras resultarán en un impacto positivo significativo en la salud y el bienestar de los trabajadores, reduciendo problemas respiratorios, fatiga y estrés asociados con una ventilación insuficiente, y proporcionando un margen adicional para manejar emergencias como incendios o fugas de gases tóxicos.

5.3.3.2 Mejora en la productividad del proceso de minado

De la información proporcionada por Geología y Planeamiento, se prevé la presencia de mineralización con leyes considerables al Sur; por lo cual, al tener un caudal excedente favorece las condiciones para una posible expansión sin realizar mejoras inmediatas en la infraestructura de ventilación, flexibilidad operativa que permitirá redirigir el aire fresco a nuevas áreas de trabajo o zonas con problemas de ventilación en un corto plazo; y minimizar los efectos negativos de las turbulencias y zonas de estancamiento del aire (stall), asegurando un flujo constante y efectivo.

McPherson (2009) sostiene que al no fomentar un entorno de trabajo razonablemente cómodo en el lugar de trabajo pone en riesgo no solo la salud y la seguridad de los empleados, sino que también reduce la productividad y la rentabilidad del negocio.

A continuación, se describen los principales componentes del ciclo de minado que serán impactados positivamente (reduciendo tiempos operativos) al mejorar el sistema de ventilación actual. Asimismo, estos tiempos operativos actuales han sido brindados por el área de Operaciones de la Unidad Minera.

Williams y Brune (2017) investigaron cómo la ventilación adecuada en minas subterráneas no solo garantiza un entorno de trabajo seguro y saludable, sino que también mejora la eficiencia de los procesos mineros. Señalaron que una buena ventilación puede reducir los tiempos de ejecución de los procesos al minimizar el tiempo de inactividad por problemas de salud y evacuaciones, y al optimizar el rendimiento de la maquinaria.

Moolman y Roberts (2015) exploraron los beneficios de los sistemas de ventilación

mejorados en la minería subterránea. Sus hallazgos sugieren que una ventilación eficiente puede acelerar los procesos mineros al reducir el estrés térmico en los trabajadores, mejorar la calidad del aire y, por ende, incrementar la eficiencia operativa. Esto incluye una reducción en los tiempos de ejecución debido a menos interrupciones y un mejor desempeño de los equipos.

De las investigaciones, se toma como base para plantear las siguientes afirmaciones sobre la reducción de tiempos en la ejecución de los procesos mineros, los cuales se detallan a continuación.

Perforación y Voladura

Actualmente, la perforación y voladura en el frente del Nivel 460 toma aproximadamente 110 minutos por guardia. Con la implementación de las mejoras al sistema de ventilación, se espera una reducción en la fatiga de los trabajadores y una mejora en la visibilidad, lo que incrementará la eficiencia de estas actividades. Se estima que, debido a la exposición y las actividades operativas, el tiempo necesario será un 95% del actual, es decir, 104.50 minutos.

Ventilación

Tal como se ha mencionado anteriormente, en la situación actual, la ventilación y la evacuación de gases en el frente del Nivel 460 requieren 54 minutos antes de permitir el acceso nuevamente. Con la implementación de las mejoras en el sistema de ventilación, se espera una evacuación eficiente sin recirculación ni afectación a otras operaciones, reduciendo el tiempo de ingreso al frente a 10 minutos.

Carguío

Actualmente, el tiempo requerido para el carguío del material volado en el frente del Nivel 460 es de aproximadamente 8 minutos por ciclo. Con la implementación de las mejoras en el sistema de ventilación, se espera una reducción en la cantidad de polvo y una mejora

en la calidad del aire, creando un entorno más seguro y cómodo para los operadores de los scoops. Además, una mejor visibilidad aumentará la eficiencia, reduciendo así los tiempos de carguío y disminuyendo el desgaste del equipo, lo que resultará en menos pausas para mantenimiento. Se estima que, debido a las condiciones operativas y la exposición, el tiempo se reducirá al 90% del actual, es decir, de 97.2 a 87.48 como tiempo total de limpieza.

Acarreo (transporte)

En la operación actual, el acarreo del material volado del frente del Nivel 460 tiene un periodo de realización de aproximadamente 70 minutos/ciclo. Con la aplicación de la mejora del sistema de ventilación, debido a la disminución de tiempo de inactividad por condiciones adversas del aire, reduciendo tiempos de descanso de los operadores por el entorno saludable y la mejor visibilidad. Por lo descrito, se asumirá que debido al grado de exposición (fuera del frente de avance) y actividades propias de la operación, el tiempo será el 95% del tiempo actual (66.5 minutos/ciclo).

5.3.3.3 Mejora en la productividad del personal del Nivel 460

La condición de un ambiente laboral más saludable puede reducir las ausencias por enfermedad entre los trabajadores, lo que contribuiría a una mayor continuidad en la operación y, por consecuencia mayor tiempo de trabajo efectivo. Mejorar la circulación de aire fresco en el entorno laboral puede incrementar tanto la capacidad física como mental de los trabajadores. Esto puede traducirse en una mayor eficiencia en la realización de tareas diarias, como la perforación, la voladura, el carguío, acarreo y transporte del material, y sostenimiento de labores.

Tomando en consideración el desarrollo de la Cortada Esperanza en el nivel 460 se presenta el cálculo de la producción del personal esperada, representada en unidades de toneladas producidas por hombre guardia respecto a una reducción de los tiempos de

operación en el proceso de minado, según se muestra en la Tabla 29.

Tabla 29

Resumen de la producción del personal con el Sistema de ventilación actual vs Sistema de ventilación optimizado

Descripción	Producción Gdia/día Cortada Esperanza 460		
	S. V. Actual	S. V. Optimizado	Unidad
Nº Trabajadores Nivel 460	7	7	und.
Sección de labor	4 x 4	4 x 4	m
Área efectiva de disparo	14.4	14.4	m ²
Longitud efectiva de avance	3.30	3.30	m
Densidad de roca	2.70	2.70	Ton/m ³
Volumen explotado por Gdia.	47.52	47.52	m ³
Cantidad de toneladas rotas	128.3	128.3	TM
Capacidad equipo de carguío	4.60	4.60	m ³
Capacidad equipo de acarreo y transporte	18	18	m ³
Tiempo de carguío/ciclo	8	7.20	min
T. de transporte (considerando T. improductivos)	70	66.50	min
Nº de ciclos carguío	12.15	12.15	C/gdía
Nº de ciclos transporte	3.11	3.11	C/gdía
Tiempo de ventilación	54	10	min
Tiempo total de limpieza	97.2	87.48	min
Tiempo de Perforación y voladura	110	104.50	min
Tiempo total de operación	7.98	6.81	h
Producción Horas Hombre	2.30	2.69	TM/HH/Gdia
Variación	0	16.96	%

De acuerdo a la Tabla 29, se obtienen resultados favorables en la producción del personal representado en unidades de toneladas producidas por hombre guardia, obteniendo un incremento esperado del 16.96% considerando la reducción de los tiempos improductivos

por el elevado tiempo de evacuación de aire viciado y el ambiente de trabajo con alta polución que reduce la eficiencia del resto de procesos del ciclo de minado.

CAPITULO VI: DISCUSIÓN E INTERPRETACIÓN

A partir de los resultados obtenidos en esta investigación, se concluye que la implementación de las mejoras al sistema de ventilación permite aumentar el caudal de aire disponible en las áreas de trabajo, logrando una cobertura de aire fresco del 132.5%, frente al 94.13% del sistema actual. En el caso específico del frente de minado en el Nivel 460, la cobertura de ventilación también muestra una mejora significativa, pasando de 95.92% a 117.4%. Estos resultados evidencian un incremento considerable en la distribución del aire, lo que contribuye a crear un ambiente de trabajo más seguro y eficiente para los trabajadores.

Estos hallazgos guardan relación con lo señalado en la investigación de Vargas (2020), quien, al implementar un diseño optimizado que redujo de 12 a 9 los ventiladores en el sistema secundario, logró no solo disminuir los costos de mantenimiento y consumo de energía, sino que también alcanzó una cobertura de aire del 100.78%. Esta mejora, además de optimizar la calidad del aire mediante balances que mostraron un ingreso de 1'118,818.42 cfm y una salida de 1'169,850.02 cfm de aire viciado, resultó en un ambiente de trabajo más saludable. En contraste, los resultados obtenidos en la investigación de Carabajo (2015) señalan que el sistema de ventilación presentaba un déficit del 75% del caudal de aire necesario para cubrir los requerimientos de la mina. Este déficit se incrementaba conforme avanzaban los trabajos de desarrollo, exacerbando la concentración de gases nocivos en las áreas más profundas de la mina, lo que afectaba negativamente tanto el desempeño de los trabajadores como las condiciones generales del ambiente laboral. Este estudio refleja las consecuencias de un sistema de ventilación insuficiente y destaca los riesgos asociados a la falta de renovación de aire en labores subterráneas.

Por otra parte, los resultados obtenidos en esta investigación, según los reportes generados por el software VentSim, evidencian que las concentraciones de CO, NO y NO₂ en intervalos de 10, 04 y 05 minutos, respectivamente, superan los límites de exposición ocupacional. De este modo, el tiempo necesario para que se alcance una ventilación adecuada y condiciones seguras de trabajo sería a partir de los 10 minutos, momento en el cual las concentraciones empiezan a ser menores a los Límites Máximos Permisibles (LMP). Estos resultados son congruentes con lo planteado por Tejeda y Mucha (2022), quienes afirman que el sistema de ventilación de la Mina Yauricocha, que opera a través de un circuito integrado, presenta altos niveles de resistencia, lo cual provoca que en ciertas etapas operativas los gases nocivos excedan los LMP. Asimismo, Villalba (2017) corrobora la exposición a CO en las zonas de trabajo, reportando concentraciones de entre 5 y 10 ppm, además de una baja velocidad del flujo de aire en el sector de la falla Ratones, situación similar a los hallazgos de esta investigación, donde se presenta la necesidad de una mayor disipación del aire para lograr condiciones seguras. Finalmente, mientras que los resultados obtenidos en esta investigación cumplen con el Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería DS 024-2016-EM, es importante destacar que Guevara (2019) concluye que las condiciones actuales en su estudio no cumplen con dicha normativa, lo que resalta la importancia de un adecuado sistema de ventilación para asegurar un ambiente de trabajo seguro.

Por último, los resultados de esta investigación reflejan un impacto significativo en la productividad del personal, evidenciado en el aumento del 16.96% en las toneladas producidas por hombre guardia. Este incremento se atribuye a la disminución de los tiempos improductivos causados por la evacuación prolongada de aire viciado y la exposición a ambientes laborales con alta polución, factores que afectaban directamente la eficiencia de los procesos operativos. Este hallazgo está en línea con lo expuesto por

Escobar y Rodas (2020) quienes argumentan que un sistema de ventilación eficiente tiene el potencial de mejorar considerablemente las condiciones laborales. En su investigación, se señaló que las oportunidades de mejora en el sistema de ventilación impactaban negativamente en la calidad del entorno de trabajo, lo que en última instancia afectaba la productividad. Por otro lado, el presente trabajo también ha contemplado un aumento en el caudal de aire que permitirá afrontar las futuras expansiones mineras. Este enfoque preventivo es crucial para evitar complicaciones futuras, como lo menciona Llano (2017), quien advierte que la veta Santa Filomena podría enfrentar problemas de ventilación en el futuro debido a la falta de infraestructura adecuada, sugiriendo la necesidad de chimeneas adicionales. Mientras Llano anticipa dificultades, la presente investigación ya considera dichas expansiones, lo que asegura el cumplimiento del plan de minado a corto plazo, brindando un soporte sostenible a la producción.

CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

- La optimización del diseño del sistema de ventilación genera un aumento en la producción de toneladas por hombre guardia de 2.30 a 2.69 (16.96%) debido a la reducción de tiempos por el aumento en la eficiencia de los procesos producto de la mejora del sistema de ventilación, estos datos demuestran cómo la mejora del ambiente de trabajo y la eficiencia operativa están estrechamente relacionados con un aumento en la productividad del personal en labores mineras.
- La unidad minera bajo estudio presenta una circulación de aire fresco con una cobertura del 94.13%; por lo que no cumple con los límites requeridos por la normativa peruana del sector minero, por ende, es necesaria la aplicación de mejoras al sistema de ventilación que permita brindar un ambiente de trabajo seguro y un aumento en la productividad de los trabajadores.
- Se determinó que se requiere un caudal de aire de 22,149 cfm en el nivel 460 de la Cortada Esperanza que brinda condiciones apropiadas para los trabajadores; esto indica que los cambios realizados en el diseño sistema de ventilación lograron satisfacer con un superávit de 3,860 cfm que permitirá abordar contingencias.
- Se determinó los cambios que optimizan el sistema de ventilación, los cuales comienzan con la construcción del Raise Borer RB-380 para suministrar aire fresco desde la superficie, complementado por un ventilador inyector en la base del Nivel 520, que inicialmente abastecerá aire al frente de avance del Nivel 460 y se proyecta como una fuente crucial para la expansión hacia el sur. Además, se planea instalar un ventilador TOMOCORP de 95,000 CFM en la cabeza de la chimenea para extraer aire viciado de todos los niveles inferiores, transportándolo

a la superficie a través del RB-400. También se contempla aumentar la capacidad de los ventiladores inyectores de los niveles 460 y 520, incrementándolos de 40,000 CFM a 50,000 CFM y de 40,000 CFM a 55,000 CFM, respectivamente, para proveer aire a los frentes de minería. Por último, se incluye la construcción del Raise Bore RB-480 con un ventilador Howden 7200-VAX-3150 de 100,000 CFM, diseñado para extraer el aire viciado generado por la explotación de los cuatro frentes de minería, incluyendo el frente del Nivel 460.

7.2 Recomendaciones

- Continuar implementando mejoras en el diseño del sistema de ventilación con base en los hallazgos obtenidos, priorizando la construcción y operación eficiente de infraestructuras como Raise Bores y ventiladores de alta capacidad. Además, considerar herramientas avanzadas de simulación para proyectar la expansión futura hacia nuevas áreas mineras.
- Realizar un monitoreo constante de la cobertura de aire fresco en todos los niveles operativos para asegurar el cumplimiento de la normativa peruana y contribuir así a garantizar condiciones seguras para los trabajadores.
- Mantener el excedente de caudal de aire disponible para ser utilizado como una reserva estratégica para responder rápidamente a contingencias operativas, como eventos de concentración de gases o expansión repentina de actividades.
- Establecer un programa de evaluación periódica del desempeño del sistema de ventilación para identificar áreas de mejora potenciales. Esto debe incluir revisiones del impacto de las modificaciones implementadas en la productividad de los trabajadores y en las condiciones del ambiente de trabajo.

CAPÍTULO VIII: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aire, A. y. (2016). Ventilar las oficinas para ser productivo. *Higiene Ambiental*. Obtenido de <https://higieneambiental.com/aire-agua-legionela/ventilar-las-oficinas-para-ser-productivo>
- APRIMIN, A. d. (Mayo de 2017). Propuestas de Mejoramiento de Productividad en la Minería. Chile.
- Camargo, G., & Segura, D. (2023). *Desarrollo de una chimenea de ventilación en una mina ubicada al centro del Perú aplicando el sistema Raise Boring*.
- Carabajo, C. (2015). *Diseño del circuito de ventilación de la zona norte de la mina Cabo de Hornos, ubicada en el distrito aurífero - polimetálico Portovelo – Zaruma*. Quito: Universidad Central del Ecuador.
- Catalán, F. (2018). FORMULA DE ATKINSON-Ventilacion de Minas. *Instituto Profesional de Chile*.
- Claverias, J. (2014). EVALUACIÓN Y OPTIMIZACION DEL SISTEMA DE VENTILACION DE LA COMPAÑÍA MINERA CARAVELI S.A.C APLICANDO EL SOFTWARE VENTSIM VISUAL 3. Arequipa, Peru: Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Díaz Flores, R. (2019) Optimización del sistema de Ventilación como un método de control de la calidad del aire en la mina San Rafael de la región Puno. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- El Peruano. (2020). Modifican la Norma Técnica EM.030 Instalaciones de Ventilación del Reglamento Nacional de Edificaciones y dictan otras disposiciones. *El Peruano*.
- Escobar, B. A., & Rodas, G. C. (2020). Evaluación del Sistema de Ventilación en la Minera Artesanal Subterránea de Algamarca, Cajabamba. *Tesis para Optar el Grado de Bachiller-Universidad Cesar Vallejo*, 1-58.
- Fonttis, G. (2020). *Estudio y diseño 3D del sistema de ventilación para su optimización actual y proyectada, caso estudio Mina Inmaculada - Hochschild Mining PLC*.
- Guevara, W. (2019). Sistema de ventilación para incrementar la productividad en el proyecto Cuchi Corral Minera San Sebastián de Suyo Piura 2018. Perú: Universidad Cesar Vallejo. Obtenido de <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/52035>
- Hartman, H., Mutmanský, J., Ramani, R., & Wang, Y. (1997). *Mine ventilation and aire conditioning*. John Wiley & Sons.
- Hartman, H., Mutmanský, J., Ramani, R., & Wang, Y. (1997). MINE VENTILATION AND AIRE CONDITIONING. *Third Edition*. Canada.
- Helguero, H., & Medinaceli, R. (2020). Robot Minero: Sistema Detector de Gases utilizando Sensores en Tiempo Real MIN – SIS 1.0 SDG-STR. *Revista de Medio Ambiente y Minería*.
- Herrera, J. (2019). Introducción a la ventilación minera. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía.
- Herrera, J. (2019). *Introducción a la ventilación minera*. Madrid.
- INACAP. (2010). Manual Software Ventsim. *INACAP*.
- Karagianni, M., & Benardos, A. (2021). Ventilation Design Modeling and Optimization for an Underground Bauxite Mine. *MDPI*.
- LLano, C. (2017). Estudio de Ventilacion e Implementacion de mejoras en el Circuito de Ventilacion de Minera SOTRAMI S.A- UEI Santa Filimena-Aplicando el Software Ventsim". *Tesis para Optar el Titulo Profesional-Universidad Nacional*

- de San Agustín de Arequipa*, 1-192.
- Maleki et al., S. (2018). Application of VENTSIM 3D and mathematical programming to optimize underground mine ventilation network: A case study. *Journal of Mining & Environment*.
- McPherson, M. J. (1993). *Subsurface ventilation and environmental engineering*. Chapman & Hall.
- McPherson, M. (2009). Ingeniería de la ventilación subterránea. 2da edición.
- MINEM. (2023). *Boletín Estadístico Minero Abril 2023*. Boletín, Ministerio de Energía y Minas. Obtenido de <https://www.gob.pe/institucion/minem/informes-publicaciones/4286097-boletin-estadistico-minero-abril-2023>
- Moolman, D. W., & Roberts, D. P. (2015). *Enhancing underground mining efficiencies through improved ventilation systems*.
- Oniyide, G. (2022). Predicting the Re-Entry Time at Chirano Gold Mine Limited Southwestern Ghana using VentSim Simulation Software. *Nigerian Journal Of Engineering*.
- Open Critical Care. (2019). Consumibles del cuidado respiratorio-¿Cuáles son los diferentes tipos de circuitos de ventilación? *Open Critical Care*.
- Positiva. (2017). *Guía de seguridad para ventilación de minas subterráneas*.
- Quispe Caceres, P. (2019). Ventilación de Minas Subterráneas Natural y Mecánica. *Universidad Nacional del Altiplano*, 1-68.
- Raico, A. (2019). EVALUACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN DEL TÚNEL DE EXPLORACIÓN CHAQUICOCHA NIVEL 3750 - MINERA YANACOCCHA, 2018 . Cajamarca, Peru: Universidad Nacional Cajamarca.
- Ramírez, N. A., & Fuentes, C. F. (2019). Modelamiento del Sistema de Ventilación y Control de Metano con el simulador Ventsim TM en la Mina Subterránea de Carbon Fezmine, Polonia. *Informe de Memoria de Título para optar al título Profesional-Universidad de Concepción*, 1-169.
- Ricse, R. (2021). *Diseño del circuito de ventilación para evacuar los gases, humo y polvo en suspensión en las labores de la galería principal en la mina artesanal Aurex-Acopalca, Pasco 2018*.
- Tejeda, R., & Mucha, F. (2022). Evaluación de las condiciones de ventilación para la actualización del sistema integral de ventilación Unidad Minera Yauricocha. Huancayo, Perú: Universidad Continental.
- Vargas, V. (2020). Propuesta técnica económica de mejora para el diseño del sistema de ventilación principal de una operación minera subterránea - Cobriza 2020. *Tesis para optar el Grado Académico de Bachiller*, 1-103.
- Ventius. (2017). Polvo en Minería- Sistema Control de Polvo. *VENTIUS*, 1-18.
- Villalba, M. (2017). *Diseño del circuito de ventilación de la Mina Bonanza, operada por la empresa Exportadora Aurífera S.A, EXPAUSA, ubicada en el Distrito Minero Ponce Enríquez*. 2017: Universidad Central del Ecuador.
- Williams, T. A., & Brune, J. F. (2017). *Ventilation and occupational health in mining: The impact on efficiency and productivity*.

ANEXOS

Anexo 1 *Matriz de consistencia*

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	METODOLOGIA
General	General	General	Variable dependiente.		Diseño de investigación
¿Cómo un óptimo diseño del sistema de ventilación incrementará la productividad de los trabajadores en el nivel 460 de la Cortada Esperanza, 2023?	Optimizar el sistema de ventilación para el incremento de la productividad de los trabajadores en el nivel 460 de la Cortada Esperanza, 2023.	La optimización del diseño del sistema de ventilación permitirá incrementar la productividad de los trabajadores en el nivel 460 de la Cortada Esperanza, 2023.	- Incremento de la productividad de los trabajadores. Variable independiente. - Diseño óptimo del sistema de ventilación.		Esta investigación emplea una metodología de enfoque cuantitativo, ya que se llevará a cabo un monitoreo y registro de la situación actual del sistema de ventilación en el nivel 460 de la

					cortada Esperanza.
Específicos • ¿Cuáles son las condiciones del ambiente laboral que afectan el incremento de la productividad de los trabajadores en el nivel 460 de la Cortada Esperanza, 2023? • ¿Cuál es el requerimiento de aire fresco que permite el incremento de la productividad de los	Específicos • Diagnosticar las condiciones del ambiente laboral que afectan el incremento de la productividad de los trabajadores en el nivel 460 de la Cortada Esperanza, 2023. • Determinar el requerimiento de aire fresco que				Población La población de estudio incluye todos los elementos relevantes del entorno de una mina subterránea que afectan los requerimientos de aire fresco. Esto abarca a los colaboradores que operan en el nivel 460, los equipos

trabajadores en el nivel 460 de la Cortada Esperanza, 2023? • ¿Cuáles serán los cambios en el diseño del sistema de ventilación que incrementará la productividad de los trabajadores en el nivel 460 de la Cortada Esperanza, 2023?	permita el incremento de la productividad de los trabajadores en el nivel 460 de la Cortada Esperanza, 2023. • Determinar los cambios en el diseño del sistema de ventilación que incrementará la productividad de los trabajadores				utilizados en las labores mineras, las diferentes actividades y las fuentes de contaminación presentes. La mina subterránea en cuestión se encuentra en la región de Áncash, Perú, y su análisis se centra en asegurar condiciones adecuadas de ventilación.
---	--	--	--	--	---

	en el nivel 460 de la Cortada Esperanza, 2023.				Muestra Dado que la investigación pretende abarcar la totalidad de los elementos involucrados en las operaciones del nivel 460 de la mina subterránea, se considerará toda la población descrita.
--	--	--	--	--	---