UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

Tesis

Propuesta del sistema de ventilación y simulación con el software Ventsim en las operaciones de la mina Milagros, empresa minera American Real Estate S. A. C. Andahuaylas - 2024

Presentado por:

Charles Auccapuma Llalli

Para optar el título de Ingeniero de Minas

Abancay, Perú

2025

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

TESIS

Propuesta del sistema de ventilación y simulación con el software Ventsim en las operaciones de la mina Milagros, empresa minera American Real Estate S.A.C. Andahuaylas - 2024

Presentado por **Charles Auccapuma Llalli**, para optar el título de Ingeniero de Minas

Sustentado y aprobado el 21 de mayo del 2025 ante el jurado evaluador:

Presidente: _____
Dr. Leoncio Carnero Carnero

Primer miembro: _____
Dr. Crisologo Conza Ancaypuro

Segundo miembro: _____
Ing. Alex Fidel Becerra Camacho

Asesor: _____
Dr. Walquer Huacani Calsin

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

UNIVERSIDAD NACIONAL
MICAELA BASTIDAS
DE APURIMAC
Licenciada por SUNEDU

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD
Nº 072-2025

La Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, a través de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería declara que, la Tesis intitulada: **"PROPUESTA DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN Y SIMULACIÓN CON EL SOFTWARE VENTSIM EN LAS OPERACIONES DE LA MINA MILAGROS, EMPRESA MINERA AMERICAN REAL ESTATE S. A. C. ANDAHUAYLAS - 2024",** presentado por el Bach **Charles Auccapuma Llalli,** Para optar el Título de **Ingeniero de Minas;** ha sido sometido a un mecanismo de evaluación y verificación de similitud, a través del Software Turnitin, siendo el índice de similitud ACEPTABLE de **(22%)** por lo que, cumple con los criterios de originalidad establecidos por la Universidad.

Abancay, 19 de febrero del 2025

UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURIMAC
Dr. Lintol Contreras Salas
DIRECTOR DE LA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA

C. c.
Archivo
REG. N°205

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

Agradecimiento

A mis padres, cuyo amor y esfuerzo me formaron, de la misma manera a la universidad por haberme brindado conocimientos básicos de gran importancia en mi formación profesional.

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

Dedicatoria

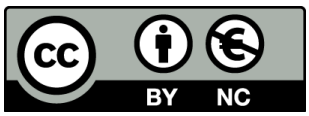
A mis padres, por ser quienes me moldearon y me ayudaron a convertirme en la persona que soy hoy, siempre con su apoyo incondicional. También agradezco a mi hermana y a mis hermanos, por todo lo que significan para mí.

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

Propuesta del sistema de ventilación y simulación con el software Ventsim en las operaciones de la mina Milagros, empresa minera American Real Estate S. A. C. Andahuaylas - 2024

Línea de investigación: Minería, procesamiento de minerales.

Esta publicación está bajo una Licencia Creative Commons



Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

ÍNDICE

		Pág.
INTRODUCCIÓN		1
RESUMEN		3
ABSTRACT		4
CAPÍTULO I		5
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA		5
1.1	Descripción del problema	5
1.2	Enunciado del Problema	7
1.2.1	Problema general	7
1.2.2	Problemas específicos	7
1.2.3	Justificación de la investigación	7
1.2.4	Ubicación y accesibilidad	9
OBJETIVOS E HIPÓTESIS		12
2.1	Objetivos de la investigación	12
2.2.1	Objetivo general	12
2.2.2	Objetivos específicos	12
2.2	Hipótesis de la investigación	12
2.2.3	Hipótesis general	12
2.2.4	Hipótesis específicas	13
2.3	Operacionalización de variables	13
CAPÍTULO III		14
MARCO TEÓRICO REFERENCIAL		14
3.1	Antecedentes	14
3.2	Aspectos generales	20
3.2.1	Características climáticas	20
3.2.2	Características geológicas	22
3.2.2.1	Geología regional	22
3.2.2.2	Estructuras geológicas	23
3.2.2.3	Geología local	24
3.2.2.4	Geología Económica	24
3.3	Aspectos generales de la mina	25
3.3.1	Descripción de la mina	25
3.3.2	Método de explotación	26

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

3.3.3 Campamento 26
3.3.4 Recurso humano 27
3.4 Marco teórico 27
3.4.1 Ventilación 27
3.4.2 Necesidad de ventilación 28
3.4.2.1 Ventilación natural 29
3.4.2.2 Ventilación mecánica 29
3.4.3 Ventilación subterránea 30
3.4.3.1 Requerimiento de aire total 30
3.4.3.2 Requerimiento de aire por personal 30
3.4.3.3 Requerimiento de aire por consumo de madera 30
3.4.3.4 Requerimiento de aire por temperatura en labores de trabajo 31
3.4.3.5 Requerimiento de aire por equipo con motor diesel 31
3.4.3.6 Requerimiento de aire por consumo de explosivo 32
3.4.3.7 Requerimiento de aire por fugas 32
3.5 Ventiladores 32
3.5.1 Ventiladores axiales 32
3.5.2 Ventilador centrifugo 33
3.5.3 Software de ventilación 34
3.5.3.1 Software ventsim 34
3.5.3.2 Ley de Kirchoff 35
3.5.3.3 Método de Hardy Cross 36
3.5.3.4 Ley de Atkinson 37
3.5.4 Herramientas del Software Ventsim 39
3.5.5 Características del Ventsim 39
3.5.6 Condiciones de trabajo 39
3.5.7 Caudal de aire 40
3.5.8 Velocidad de aire 40
3.5.9 Densidad del aire 40
3.6 Presión del aire en altura 41
3.7 Circuito de ventilación 41
3.7.1 Flujo de aire 41
3.7.1.1 Flujo de aire en paralelo 42
3.7.1.2 Flujo de aire en serie 43
3.7.2 Resistencia de flujo de aire 44
3.7.2.1 Pérdida por fricción 44
3.7.3 Reguladores de flujo de aire 45
3.8 Marco conceptual 45

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

CAPÍTULO IV 49
METODOLOGÍA 49
4.1 Tipo y nivel de investigación 49
4.1.1 Tipo de investigación 49
4.1.2 Nivel de investigación 49
4.2 Diseño de la investigación 49
4.3 Ética de la investigación 50
4.4 Población y muestra 50
4.4.1 Población 50
4.4.2 Muestra 50
4.5 Procedimiento 50
4.5.1 Trabajo de gabinete 51
4.5.2 Trabajo de campo 51
4.5.3 Trabajo de gabinete 51
4.5.3.1 Cálculo de caudal total requerido 51
4.5.3.2 Tratamiento de datos 52
4.6 Técnica e instrumentos 53
4.6.1 Técnicas 53
4.6.2 Instrumentos 53
4.6.3 Softwares 53
4.7 Análisis estadístico 53
CAPÍTULO V 54
RESULTADOS Y DISCUSIONES 54
5.1 Análisis de resultados 54
5.1.1 Diagnóstico inicial de red de ventilación 54
5.1.2 Cálculo de flujo de aire natural en diferentes puntos de la galería principal 55
5.1.3 Gases presentes en las labores 56
5.1.4 Requerimiento de caudal de aire total para la operación 56
5.1.4.1 Caudal requerido por número de trabajadores 57
5.1.4.2 Caudal requerido por consumo de madera. 57
5.1.4.3 Caudal requerido por temperatura. 58
5.1.4.4 Caudal requerido por equipos diésel. 58
5.1.4.5 Caudal requerido por fugas 59
5.1.4.6 Caudal requerido para la operación 59
5.1.5 Dimensionamiento de la ventiladora 60
5.1.5.1 Velocidad de aire en la galería 60
5.1.5.2 Sección de la manga 60
5.1.5.3 Velocidad en la manga 61

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

5.1.6 Capacidad de la ventiladora 61
5.1.7 Cálculo de la densidad del aire en mina 62
5.1.8 Determinación de las pérdidas de Presión 62
5.1.9 Requerimiento de caudal de aire Vs. caudal de ingreso de aire de forma natural. 64
5.1.10 Simulación del sistema de ventilación con el software Ventsim 64
5.1.11 Resultado de la simulación con los nuevos cálculos de caudal requerido 65
5.2 Contrastación de hipótesis 68
5.3 Discusión 69
CAPÍTULO VI 70
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 70
6.1 Conclusiones 70
6.2 Recomendaciones 71
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 72
ANEXOS 75

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

ÍNDICE DE TABLAS

Pág.

Tabla 1 — Cuadro de coordenadas de la concesión JOSNITORO 17 10

Tabla 2 — Acceso a la unidad minera por la ruta 01 10

Tabla 3 — Acceso a la unidad minera por la ruta 02 11

Tabla 4 — Operacionalización de variables 13

Tabla 5 — Factor de producción de acuerdo al consumo de madera 31

Tabla 6 — Velocidad mínima 31

Tabla 7 — Composición de aire seco 46

Tabla 8 — Oxigeno consumido por los seres humanos 48

Tabla 9 — Ingreso de aire a las labores 54

Tabla 10 — Salida de aire viciado. 55

Tabla 11 — Cálculo de flujo de aire en distintos puntos de la galería principal 55

Tabla 12 — Monitoreo de gases en la galería 56

Tabla 13 — Número de trabajadores por guardia 57

Tabla 14 — Características del equipo diésel 58

Tabla 15 — Cantidad de aire requerido para la operación 59

Tabla 16 — Parámetros calculados 61

Tabla 17 — Cuadro comparativo de caudal de aire requerido Vs caudal natural de aire en mina 64

Tabla 18 — Matriz de consistencia 76

Tabla 19 — Tabla para determinar el factor de fricción (K) 79

Tabla 20 — Tabla de fricción para minas metálicas 79

Tabla 21 — Velocidad del flujo de aire en frente de trabajo 85

Tabla 22 — Flujo de aire en el frente de trabajo 86

Tabla 23 — Medida de temperatura galería principal desde la bocamina 86

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.

Figura 1 — Ubicación de la unidad minera AMERICAN REAL ESTATE S.A.C. 9
Figura 2 — Diagrama de temperaturas máximas y mínimas de todo el año 20
Figura 3 — Precipitaciones de todo el año 21
Figura 4 — Ocurrencias de la mineralización que se emplaza alrededor del intrusivo 23
Figura 5 — Campamento de la unidad minera 27
Figura 6 — Cantidad de aire según la altitud del trabajo 28
Figura 7 — Hélice de ventilador 33
Figura 8 — Interior de una ventiladora 33
Figura 9 — Carcasa de una ventiladora 34
Figura 10 — Primera ley de Kirchhoff 35
Figura 11 — Segunda ley de Kirchhoff 36
Figura 12 — Gráfico de la presión 37
Figura 13 — Circuito en Paralelo 43
Figura 14 — Circuito en Serie 43
Figura 15 — Digitalización de curva característica del ventilador 65
Figura 16 — Visualización de la simulación del proyecto 66
Figura 17 — Velocidad y caudal mejorado 67
Figura 18 — Curva característica del nuevo ventilador 67
Figura 19 — Simulación de contaminante (CO) con caudal requerido actual 68
Figura 20 — Curva característica del ventilador (VAV-25 ¼-18-3450-II-A) 80
Figura 21 — Características del ventilador 80
Figura 22 — Vista de perfil en el software MinePlane 3D para la visualización de las labores 81
Figura 23 — Vista de planta de las labores en el Software VentSim 81
Figura 24 — Fotografía de Ventiladora axial y Manga de ventilación 82
Figura 25 — Fotografía de Generador de energía 55k 82
Figura 26 — Fotografía de Scooptram -ST2G -Atlas Copco 83
Figura 27 — Equipo Multideterctor ALTAIR 5X MSA 83
Figura 28 — Oxigeno mejorado según el reporte 84

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

Figura 29 — Plano de ubicación 87
Figura 30— Plano topográfico 88
Figura 31 — Plano topográfico de labores 89
Figura 32— Plano longitudinal del proyecto 90
Figura 33 —Plano geológico, corredor de skarn 91

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

INTRODUCCIÓN

En el contexto de la minería subterránea, uno de los aspectos fundamentales es el diseño y gestión de los sistemas de ventilación. La ventilación adecuada no solo es esencial para proporcionar aire fresco y reducir la concentración de gases tóxicos, sino también para mantener condiciones de trabajo seguras y optimizar el rendimiento de las operaciones.

La Mina Milagros, ubicada en Andahuaylas y operada por la empresa minera American Real Estate S.A.C., representa un escenario en el que la optimización del sistema de ventilación es particularmente relevante. La mina enfrenta desafíos relacionados con la ventilación, que pueden impactar tanto en la seguridad de los trabajadores como en la eficiencia de las operaciones. En este contexto, la propuesta de un sistema de ventilación mejorado, respaldado por la simulación del circuito mediante el software Ventsim, surge como una solución estratégica para abordar estos desafíos.

El software Ventsim se presenta como una herramienta avanzada para modelar y simular sistemas de ventilación en minas, permitiendo la visualización y análisis detallado de los flujos de aire, la distribución de ventiladores, y la interacción de diversos factores que afectan el ambiente subterráneo. La capacidad de Ventsim para modelar escenarios complejos y prever el impacto de diferentes configuraciones de ventilación ofrece una ventaja significativa en la implementación de soluciones efectivas.

Este proyecto de tesis tendrá como objetivo desarrollar una propuesta integral para el sistema de ventilación de la Mina Milagros, utilizando software Ventsim para simular el circuito de ventilación. Se pretende mejorar las situaciones laborales en la mina, garantizar la seguridad de los trabajadores y aumentar la eficiencia operativa mediante un diseño de ventilación que se ajuste a las necesidades específicas del entorno minero. Es así que esta propuesta no solo busca resolver los problemas actuales relacionados con la ventilación, sino también establecer un marco para la implementación de tecnologías y metodologías avanzadas en la minería, contribuyendo a la mejora continua de las operaciones. La implementación efectiva de este sistema de ventilación mejorado puede servir como modelo para futuras intervenciones en

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

proyectos mineros similares, promoviendo prácticas más seguras y eficientes en la industria minera.

Por ello se plantea este proyecto de investigación, la cual titula “Propuesta del sistema de ventilación y simulación con el software Ventsim en las operaciones de la mina Milagros, empresa minera American Real Estate S. A. C. Andahuaylas - 2024” a fin de solucionar el problema de ventilación, expuesto líneas arriba. El contenido del presente trabajo de investigación es el siguiente: En el capítulo I se menciona el planteamiento del problema, la justificación de la investigación y la ubicación del proyecto; en el capítulo II los objetivos e hipótesis del proyecto de investigación; en el capítulo III el marco teórico relacionado a la implementación de ventilación que anteriormente se hayan desarrollado en otras unidades mineras utilizando el software Ventsim; en el capítulo IV se detalla el tipo de investigación, diseño de investigación y método de investigación, que serán necesarios analizar los parámetros de las variables independiente y dependiente, también sus dimensiones, como: caudal del aire, presión de aire, analizando los resultados en base a la aplicación del software, en el capítulo V se detalla los resultados y discusiones de la investigación, y por último se detalla las conclusiones y recomendaciones.

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

RESUMEN

La ventilación no solo es proporcionar aire fresco y reducir la concentración de gases tóxicos, sino también para mantener condiciones de trabajo seguras y optimizar el rendimiento de las operaciones. La tesis titulada "Propuesta del Sistema de Ventilación y Simulación con el Software Ventsim en las Operaciones de la Mina Milagros, Empresa Minera American Real Estate SAC Andahuaylas - 2024" tiene como objetivo presentar una propuesta práctica para optimizar el sistema de ventilación en la Mina Milagros mediante el uso del software Ventsim. La metodología de investigación es aplicada y propositiva, ya que está orientada a resolver problemas específicos en dicha mina. Además, el diseño empleado es cuasi experimental, para determinar la efectividad de la ventilación mecánica. Según los cálculos realizados y la simulación con el software Ventsim, se determina que el flujo de aire necesario para la ventilación del personal, los equipos diésel y la dilución de gases tóxicos en las labores es de 20,000 cfm. Este flujo opera con una presión de 9.7 pulgadas de agua y requiere una potencia de 55hp del ventilador, suministrado con una manga de ventilación de 24 pulgadas de diámetro desde la bocamina, el sistema de ventilación será impelente. En conclusión, el uso del software Ventsim nos ha permitido simular y analizar el sistema de ventilación en la mina milagros.

Palabras clave: *Aire, flujo, simulación, Ventsim y ventilación.*

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

ABSTRACT

Ventilation is not only to provide fresh air and reduce the concentration of toxic gases, but also to maintain safe working conditions and optimize the performance of operations. The thesis titled "Proposal for the Ventilation and Simulation System with the Ventsim Software in the Operations of the Milagros Mine, empresa minera American Real Estate SAC Andahuaylas - 2024" aims to present a practical proposal to optimize the ventilation system at the Milagros Mine through the use of the Ventsim software. The research methodology is applied and purposeful, since it is aimed at solving specific problems in said mine. Furthermore, the design used is quasi-experimental to determine the effectiveness of mechanical ventilation. According to the calculations carried out and the simulation with the Ventsim software, it is determined that the air flow necessary for the ventilation of personnel, diesel equipment and the dilution of toxic gases in work is 20,000 cfm. This flow operates with a pressure of 9.7 inches of water and requires a fan power of 55hp, supplied with a 24-inch diameter ventilation sleeve from the minehead, the ventilation system will be impelling. In conclusion, the use of the Ventsim software has allowed us to simulate and analyze the ventilation system at the Miraculous mine.

Keywords: *Air, flow, simulation, Ventsim and ventilation.*

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

CAPÍTULO I
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción del problema

En el contexto internacional, las minas subterráneas enfrentan varios desafíos comunes en el diseño y mantenimiento de sistemas de ventilación, donde las variaciones en las formaciones geológicas pueden afectar significativamente la eficacia de los sistemas de ventilación. Diferentes tipos de rocas y la presencia de gases naturales complican el diseño, ya que requieren soluciones personalizadas para cada tipo de terreno.

El diseño de una red de ventilación eficaz en minas subterráneas es esencial para garantizar la seguridad y la eficiencia operativa. El software Ventsim se ha convertido en una herramienta fundamental en este proceso, permitiendo a los ingenieros modelar, analizar y optimizar los sistemas de ventilación. Sin embargo, la implementación de estas soluciones enfrenta diversas problemáticas en diferentes contextos, a nivel internacional, nacional y como local en las operaciones de la Mina Milagros en la provincia de Andahuaylas.

Es así que la complejidad de las estructuras subterráneas dificulta la planificación de rutas de ventilación eficientes que garanticen un suministro adecuado de aire fresco a todas las áreas de trabajo, además la necesidad de cumplir con diversas normativas y estándares internacionales puede complicar el diseño de la ventilación. Estas regulaciones varían significativamente entre países y regiones, lo que exige a las empresas mineras estar al tanto de múltiples marcos regulatorios, existe una creciente presión para reducir las emisiones de carbono y mejorar la sostenibilidad de las operaciones mineras, lo que requiere sistemas de ventilación más eficientes y menos dependientes de combustibles fósiles. La implementación de tecnologías ecológicas en la ventilación es crucial para cumplir con los objetivos de sostenibilidad. Finalmente se resalta que, aunque Ventsim es una herramienta avanzada, no todas las operaciones mineras tienen acceso a esta tecnología debido a limitaciones financieras o falta de conocimiento técnico, la eficacia del uso de Ventsim depende en gran medida de la capacitación y experiencia del personal

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

en el manejo del software. La falta de formación adecuada puede limitar los beneficios potenciales de esta herramienta.

En el contexto peruano, las minas subterráneas enfrentan desafíos específicos, como son que están situadas a gran altitud, lo que afecta la densidad del aire y, por ende, la eficiencia de la ventilación. Las bajas temperaturas y la menor presión atmosférica requieren ajustes específicos en los sistemas de ventilación, algunas regiones carecen de infraestructura básica adecuada para soportar operaciones mineras avanzadas. La falta de carreteras y redes eléctricas fiables puede dificultar la instalación y mantenimiento de sistemas de ventilación modernos y la falta de recursos financieros y tecnológicos puede impedir la implementación de sistemas de ventilación modernos y eficientes. Las limitaciones presupuestarias obligan a priorizar inversiones, a menudo dejando de lado las mejoras en ventilación. Finalmente, aunque existen regulaciones nacionales, su aplicación puede ser inconsistente, afectando la calidad y seguridad de los sistemas de ventilación. La falta de un marco regulatorio robusto y su implementación desigual pueden poner en riesgo la salud y seguridad de los trabajadores.

En las operaciones de la mina Milagros, los desafíos en el diseño y operación de sistemas de ventilación son aún más complejos, como es la accesibilidad y aislamiento debido a la lejanía de los principales centros urbanos, dificulta el acceso a recursos y tecnología avanzada. Las minas en estas áreas pueden estar desconectadas de las redes de suministro y apoyo técnico, las carreteras y otros medios de transporte pueden estar en malas condiciones, complicando el transporte de equipos y personal especializado. La logística para implementar y mantener sistemas de ventilación puede ser un desafío considerable; existe una escasez de ingenieros y técnicos especializados en ventilación minera en la región. La falta de personal capacitado limita diseñar, implementar y mantener sistemas de ventilación adecuada, las oportunidades de capacitación y actualización en el uso de software avanzado como Ventsim son limitadas. Sin programas de formación continua, los avances tecnológicos no se aprovechan plenamente.

El diseño y la optimización de redes de ventilación con el uso de Ventsim presentan una solución viable para enfrentar las problemáticas internacionales, nacionales y locales en el contexto minero. En la región de Apurímac, abordar estos desafíos a través de tecnología avanzada y capacitación específica puede transformar las operaciones mineras, mejorando la seguridad, eficiencia y sostenibilidad de las mismas. La

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

implementación de Ventsim no solo mejora las condiciones de trabajo, sino que también contribuye a la protección ambiental y al desarrollo socioeconómico de las regiones mineras.

1.2 Enunciado del Problema

1.2.1 Problema general

¿En qué medida la propuesta del sistema de ventilación y simulación con el software Ventsim influirá en las operaciones de la mina Milagros, empresa minera American Real Estate S.A.C. Andahuaylas – 2024?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Qué zonas presentan deficiencias en la ventilación según el análisis y simulación con el software Ventsim en las operaciones de la mina Milagros, empresa minera American Real Estate S.A.C. Andahuaylas – 2024?

- ¿Qué cantidad de volumen de aire será necesario para mejorar la ventilación en las operaciones en la mina Milagros, empresa minera American Real Estate S.A.C. Andahuaylas – 2024?

- ¿Qué mejoras en la calidad del aire y reducción de contaminantes se pueden lograr según la simulación con el software Ventsim en las operaciones de la mina Milagros, empresa minera American Real Estate S.A.C. Andahuaylas – 2024?

1.2.3 Justificación de la investigación

a) Justificación teórica

El análisis de redes de ventilación en minas subterráneas es esencial para asegurar un flujo de aire eficiente, minimizar la acumulación de gases tóxicos y mejorar las condiciones laborales. Herramientas avanzadas como Ventsim permiten aplicar modelos matemáticos complejos y teorías científicas para analizar y optimizar estas redes. Este software, basado en principios de dinámica de fluidos y termodinámica, ofrece un respaldo técnico sólido para tomar decisiones y garantizar un flujo optimo en el interior mina.

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

b) Justificación metodológica

La metodología empleada en este análisis implica el uso de Ventsim, un software especializado en la simulación de ventilación de minas. Este enfoque metodológico permite realizar simulaciones precisas y detalladas del comportamiento del flujo de aire en la red de ventilación existente. Además, facilita la identificación de puntos críticos y la evaluación de diferentes escenarios de mejora. La metodología incluye la recopilación de datos in situ, la modelización de la red de ventilación en el software, la ejecución de simulaciones y el análisis de los resultados para formular recomendaciones basadas en evidencia.

c) Justificación práctica

Desde una perspectiva práctica, el análisis del diseño de la red de ventilación utilizando Ventsim tiene el potencial de resolver problemas específicos de ventilación que afectan directamente la operación diaria de la mina Milagros. Al identificar áreas con deficiencias en la ventilación y proponer mejoras, se puede aumentar la eficiencia operativa, reducir tiempos de inactividad causados por problemas de ventilación y mejorar las condiciones laborales para los mineros. Esto, a su vez, contribuye a una operación más segura y productiva.

d) Justificación económica

La optimización de la red de ventilación tiene un impacto económico significativo. Una ventilación eficiente puede reducir los costos operativos al disminuir el consumo de energía requerido para mover el aire a través de la mina. Además, al mejorar la calidad del aire y reducir la exposición de los trabajadores a contaminantes, se pueden minimizar los costos relacionados con la salud y seguridad, como gastos médicos y compensaciones laborales. La inversión en tecnología de simulación avanzada como Ventsim puede resultar en un retorno positivo a largo plazo mediante la mejora de la eficiencia y la reducción de costos operativos.

e) Justificación ambiental

Desde un punto de vista ambiental, la mejora de la red de ventilación contribuye a la reducción de la huella de carbono de la mina, además al

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

mejorar la calidad del aire se reduce la cantidad de contaminantes que pueden ser liberados al medio ambiente. Este enfoque sostenible no solo beneficia a la empresa desde una perspectiva de responsabilidad social corporativa, sino que también cumple con las regulaciones ambientales y contribuye a la preservación del entorno natural.

La norma DS N° 024-2016-EM, junto con su modificación DS N° 034-2023-EM, exige garantizar la provisión de aire limpio en las zonas de trabajo, adaptándose a los requerimientos tanto de los trabajadores como de los equipos. Su propósito es eliminar gases, humos y partículas en suspensión que puedan poner en riesgo la salud de los empleados. Asimismo, se debe asegurar que la calidad del aire se mantenga dentro de los límites permitidos, garantizando una adecuada circulación de aire fresco en cantidad y calidad.

1.2.4 Ubicación y accesibilidad

Ubicación política

La unidad minera Milagros, está ubicado en la concesión JOSNITORO 17 del titular COMPAÑIA MINERA ARES S.A.C. En el distrito José María Arguedas provincia de Andahuaylas, departamento de Apurímac y está a una altitud de 4248 m.s.n.m. con registro minero por INGEMMET N° 10077504.

Figura 1 — Ubicación de la Unidad Minera AMERICAN REAL ESTATE S.A.C.

Fuente: Google Earth accedido 21/08/2024

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

Tabla 1 — Cuadro de coordenadas de la concesión JOSNITORO 17

CUADRO DE COORDENADAS CONCESIÓN JOSNITORO 17		
DATUM WGS – 84 ZONA 18 SUR		
VÉRTICES	**ESTE**	**NORTE**
V-1	675773.19	8463630.51
V-2	675773.2	8461630.49
V-3	673773.24	8461630.5
V-4	673773.23	8463630.51

Fuente: GEOCATMIN accedido 21/08/2024

Accesibilidad

Tabla 2 — Acceso a la unidad minera por la ruta 01

RUTA 1	DISTANCIA (Km)	VÍA	TIPO DE VÍA	TIEMPO (Horas)
Lima-Nazca	460	Terrestre	Asfaltada	7
Nazca-Puquio	156	Terrestre	Asfaltada	3
Puquio - Pampachiri	77	Terrestre	Asfaltada	3
Pampachiri-Ramal de Umamarca	105	Terrestre	Asfaltada	01:30
Ramal de Umamarca - U.M ARE S.A.C	6	Terrestre	Afirmada	0.5
TOTAL	**804**			15

Fuente: Elaboración propia

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

Tabla 3 — Acceso a la unidad minera por la ruta 02

RUTA 2	DISTANCIA (Km)	VÍA	TIPO DE VÍA	TIEMPO (Horas)
Abancay-Andahuaylas	142	Terrestre	Asfaltada	3.5
Andahuaylas-Huancabamba	20	Terrestre	Asfaltada	0.5
Huancabamba – Ramal de Umamarca	44	Terrestre	Afirmada	1.5
Ramal de Umamarca - U.M ARE S.A.C	6	Terrestre	Afirmada	0.5
TOTAL	**212**			**6**

Fuente: Elaboración propia

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

CAPÍTULO II
OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1 Objetivos de la investigación

2.2.1 Objetivo general

Analizar la propuesta del sistema de ventilación y simulación con el software Ventsim que influirá en las operaciones de la mina Milagros, empresa minera American Real Estate S.A.C. Andahuaylas – 2024.

2.2.2 Objetivos específicos

- Determinar las zonas que presentan deficiencias en la ventilación según el análisis y simulación con el software Ventsim en las operaciones de la mina Milagros, empresa minera American Real Estate S.A.C. Andahuaylas – 2024.

- Determinar la cantidad de volumen de aire para mejorar la ventilación en las operaciones en la mina Milagros, empresa minera American Real Estate S.A.C. Andahuaylas – 2024.

- Evaluar las mejoras en la calidad del aire y la reducción de contaminantes que se pueden lograr según la simulación con el software Ventsim en las operaciones de la mina Milagros, empresa minera American Real Estate S.A.C. Andahuaylas – 2024.

2.2 Hipótesis de la investigación

2.2.3 Hipótesis general

Al analizar la propuesta planteada del sistema de ventilación y simulación con el software Ventsim influye significativamente en las operaciones de la mina Milagros, empresa minera American Real Estate S.A.C. Andahuaylas– 2024.

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

2.2.4 Hipótesis específicas

- Se pueden identificar las zonas que presentan deficiencias en la ventilación según el análisis y simulación con el software Ventsim en las operaciones de la mina Milagros, empresa minera American Real Estate S.A.C. Andahuaylas – 2024.

- Al determinar la cantidad de volumen de aire mejora la ventilación en las operaciones en la mina Milagros, empresa minera American Real Estate S.A.C. Andahuaylas – 2024.

- En la evaluación de la calidad del aire y la reducción de contaminantes, se logra significativamente según la simulación con el software Ventsim en las operaciones de la mina Milagros, empresa minera American Real Estate S.A.C. Andahuaylas – 2024.

2.3 Operacionalización de variables

Tabla 4 — Operacionalización de variables

VARIABLES	INDICADORES	ÍNDICE	UNIDADES
VARIABLE INDEPENDIENTE. Simulación con el Software Ventsim	1.1. Características físicas del aire	1.1.1 masa	Kg
		1.1.2 Humedad	%
		1.1.3 Densidad	Kg/m^3
		1.1.4 Temperatura	°C
	1.2. Dimensiones de la labor	1.2.1 Área	m^2
		1.2.2 Altura	m
		1.2.3 Longitud	m
VARIABLE DEPENDIENTE. Propuesta del sistema de ventilación en las operaciones de la mina Milagros.	1.1.Presión del aire	1.1.1 Presión	Pa
		1.1.2 Caudal	cfm
	1.2.Distribución del flujo de aire	1.2.1 Capacidad	cfm
		1.2.2. Potencia	HP
	1.3.Flujo de aire	1.3.1 Velocidad	m/s

Fuente: Elaboración propia.

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

CAPÍTULO III
MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

3.1 Antecedentes

Se examinaron las investigaciones sobre sistemas de ventilación para minas subterráneas, junto con las tesis y artículos relacionados sobre el tema, entre ellos tenemos lo siguientes:

a) **Antecedentes Internacionales**

Rivera (2020), en su investigación titulada "Análisis del circuito de ventilación mediante simulación con ventsim de una mina subterránea de carbón artesanal en la Provincia de Arauco, region Biobio" presentado en la Universidad de Concepción, el objetivo principal de su investigación fue analizar el sistema de ventilación de un caso de estudio real de minería artesanal de carbón en la Provincia de Arauco y evaluar la viabilidad de implementar herramientas de simulación a nivel operativo. A pesar de las dificultades inherentes al trabajo de campo en una mina con poca mecanización, bajo nivel de conocimiento técnico y especialización en las operaciones mineras, y la falta de documentación técnica sobre los equipos utilizados en la minería artesanal, el análisis del circuito se realizó con éxito utilizando el software Ventsim™. Este software permitió implementar simulaciones y análisis de escenarios, logrando una confiabilidad dentro de los rangos aceptables. Finalmente, se concluye que la optimización de procesos, desde la perspectiva del ahorro de recursos económicos y energéticos, es aplicable tanto a pequeña como a gran escala. Se recomienda continuar con el estudio en futuras condiciones de explotación que permitan medir y simular adecuadamente ahorros significativos en términos de costos energéticos del sistema, manteniendo los niveles reglamentarios de caudales.

Karagianni; Bemardos (2021), en su artículo titulada "Modelado y optimización del diseño de ventilación para una mina subterránea de bauxita" presentado en la Conferencia internacional sobre materias primas y economía circular, Atenas, Grecia, su objetivo fue modelar en detalle una red de ventilación subterránea de este tipo utilizando el software Ventsim, donde la ventilación de las explotaciones subterráneas es una parte esencial de todo el proceso minero. Esta debe desarrollarse de manera racional y optimizada para evitar impactos adversos y garantizar una rentabilidad que

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

facilite aún más las operaciones. En este artículo, se completó un diseño de ventilación exitoso mediante el desarrollo de un modelo informático calibrado. Está claro que este debe ser el camino a seguir, especialmente cuando se dispone de datos comparativos útiles de mediciones reales. De esta manera, se pueden realizar estimaciones de la cantidad de flujo de aire, así como de la calidad del aire obtenida, con el nivel de detalle requerido que puede ayudar a los ingenieros a adoptar estrategias de diseño y desarrollar un sistema de ventilación flexible y, a la vez, resistente y robusto. En el caso estudiado, este proceso ha permitido obtener resultados cuantitativos y modelar de forma sencilla y exitosa el futuro sistema de ventilación de las labores mineras ampliadas. Además, puede utilizarse para modelar el sistema en tiempo casi real, en distintas soluciones, o incluso para modelar la evolución de los contaminantes del aire a lo largo del turno de trabajo en cada lugar de las labores mineras.

Castillo (2017), En su investigación titulada Evaluación del sistema de ventilación de la mina El Roble", Sogamoso-Colombia. Presentada en la Universidad Pedagógica Y Tecnológica De Colombia, Realizó una revisión del sistema de ventilación de la mina, analizando su circuito actual y realizando mediciones y cálculos de los caudales según el estado de la explotación. También se determinan los requerimientos de aire y se identifican problemas relacionados con la temperatura y la contaminación por gases generados tras las voladuras, el cargue y el transporte de material.

Donde el objetivo de investigación fue evaluar el sistema de ventilación. para mejorar las condiciones de trabajo, las cuales se ven afectadas por las constantes interrupciones debido a la ineficiencia del sistema de ventilación. En una de sus conclusiones menciona que se detectaron y evaluaron los problemas y deficiencias del sistema de ventilación en la operación minera a través de trabajo de campo, incluyendo aforos y mediciones. Además, se utilizó el software Ventsim para modelar el sistema y diseñar una solución eficiente y optimizada.

Barrera (2020), en su trabajo de investigación titulada, diseño y optimización del circuito de ventilación en el tramo norte-sur de la mina ‘‘Goldmins’’, Zaruma–El Oro. 2020. Presentada en la universidad del AZUAY- Ecuador, donde el objetivo fue el diseño de ventilación y modelamiento con el software ventsim, incluyó el cálculo del requerimiento total de aire y la resistencia equivalente de las galerías, lo que permitió

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

evaluar la cobertura actual y definir una solución efectiva mediante la adquisición de nuevos equipos capaces de mantener el sistema con la energía adecuada.

Como una de las conclusiones, se determinó que aumentar la potencia de los ventiladores extractores principales ayudaría a mejorar el sistema de succión. Sin embargo, dado que estos forman parte del circuito general de extracción, no se puede garantizar un funcionamiento completamente eficiente.

Por ello, se propone una alternativa con un diseño de circuito autónomo para el tramo norte-sur, que incluye la adquisición de un motor de 50 HP para inyectar aire fresco y otro de 20 HP para extraer el aire viciado.

b) **Antecedentes Nacionales**

Huamani (2020), en su investigación titulada "Mejoramiento del sistema de ventilación subterránea de la mina Condor IV, minera el Palacio del Cóndor S.A.C.", presentado en la Universidad Nacional del Centro del Perú, su objetivo general fue realizar un estudio de ventilación para mejorar el sistema de ventilación de la mina Condor IV, con el objetivo de determinar el diseño y método de ventilación más eficientes. Para lograr este objetivo, se llevó a cabo una evaluación minuciosa del sistema actual, tomando muestras de los agentes contaminantes a lo largo de toda la mina. Se utilizaron diferentes equipos de medición para cuantificar el caudal del aire, la temperatura, los gases y la cantidad de polvo en la mina, con el fin de identificar las falencias y obstáculos en el circuito. La información recopilada se modeló posteriormente con el software Ventsim 5.4, lo que permitió sugerir soluciones alternativas. El diseño de ventilación incluyó el cálculo del requerimiento total de aire y la resistencia equivalente de las galerías, determinando la cobertura actual y encontrando una solución efectiva mediante la simulación de escenarios en el software. Se realizaron bifurcaciones con reducción de mangas de 20" a 10" en forma de "T" hacia las chimeneas para aumentar el flujo de ingreso de aire con una tercera línea a los subniveles y tajos de producción. De esta manera, se buscó mejorar la seguridad laboral, la producción de la mina y mantener en buen estado el ambiente de las labores mineras.

Gamboa; Cotrina (2021), en su investigación titulada "Evaluación de la ventilación empleando el software Ventsim para el modelamiento del sistema en una mina subterránea polimetálica en el cerro Jesús, Hualgayoc 2021", presentado en la Universidad privada del Norte, donde su objetivo fue evaluar la ventilación utilizando

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

Ventsim, una herramienta informática especializada, la metodología utilizada fue de carácter no experimental y descriptivo, centrada en las labores de las galerías 1 y 3 de la mina subterránea polimetálica de Hualgayoc, ya que en estas galerías se realiza actualmente la extracción de minerales. Como resultado de la investigación, se concluye que las concentraciones de (NO) no superan el Límite Máximo Permisible establecido (5 ppm). Sin embargo, las concentraciones de CO sí superan el Límite Máximo Permisible (25 ppm). Además, se determina que la concentración de oxígeno en el aire es deficiente, ya que no alcanza el valor mínimo establecido en el DS N° 023-2017-EM, se concluye también que la velocidad del aire medida en la bocamina del nivel 3765 es de 31,94 m/min, con un caudal de 4962 CFM. El uso del software Ventsim permitió modelar un nuevo sistema de ventilación directa que satisface las necesidades de aire requeridas en el interior de la mina, es así que la implementación de Ventsim en la evaluación y optimización de la ventilación en la mina de Hualgayoc no solo permitió identificar y mitigar problemas relacionados con la calidad del aire, sino que también proporcionó un enfoque detallado y preciso para futuras mejoras en la gestión de la ventilación en labores subterráneas.

Jacinto; Romero (2022), en su investigación titulada “Evaluación del sistema de ventilación aplicando el software VNETPC para el diseño de la corriente de aire, presentado en la Universidad Continental, el objetivo principal fue establecer los resultados de la evaluación del sistema de ventilación utilizando el software VNETPC para diseñar la corriente de aire en la unidad minera Cobriza, sector IV, en 2022. La hipótesis general planteada fue que los resultados de dicha evaluación, considerando parámetros de presión, resistencia y cantidad de aire, influirían en el diseño de la corriente de aire en la unidad minera Cobriza, sector IV. Se empleó el método científico en una investigación de tipo aplicada, con un nivel correlacional y un diseño no experimental. La población y muestra incluyeron las labores mineras en la zona de profundización del sector IV de la unidad minera Cobriza. Se concluyó que la aplicación del software VNETPC en el sistema de ventilación permitió elaborar un plano isométrico de la galería principal de la zona de profundización de la unidad minera Cobriza, sector IV. Este plano facilitó el diseño de la corriente de aire, considerando el caudal necesario para los trabajadores, equipos, explosivos y la pérdida de presión debido a la sinuosidad de la labor minera.

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

Carpio (2022), en su investigación titulada “Optimización del sistema de ventilación en minería subterránea usando Ventsim” presentada en la Universidad Nacional de Moquegua, el objetivo principal fue optimizar el sistema de ventilación en minería subterránea usando Ventsim en la Unidad Económica Administrativa (UEA) Morococha de la Sociedad Minera Austria Duvaz S.A.C. La ventilación de la mina tenía un caudal 100,1 K cfm, siendo el principal problema que se tiene un 82% de caudal requerido de ventilación a lo cual nos prolonga el tiempo de ventilación para evacuar los gases de las voladuras y la necesidad de ventilación en las diferentes labores de la mina, que no estaban considerados adecuadamente en el sistema, la metodología fue descriptiva, donde se realizó un levantamiento de ventilación y cálculos, para optimizar el sistema de ventilación en el cual nos determina el estado actual de la mina, lo primero que se hizo fue evaluar las condiciones operativas, luego se hizo el modelado en el Software Ventsim, logrando optimizar el sistema de ventilación, en la UEA Morococha, la ventilación se analizó y optimizó utilizando Ventsim. Inicialmente, el flujo de aire cubriría solo el 82% de las necesidades. Tras implementar mejoras, se logró aumentar el caudal de 100.1 K cfm a 128 K cfm, alcanzando una cobertura del 105%. Además, se identificaron las modificaciones necesarias en la mina, como la instalación de un ventilador secundario, la reubicación de ventiladores y la hermetización.

Pozo; Ari (2023), en su investigación titulada “Modelamiento y diagnóstico del circuito actual de ventilación en una mina subterránea y propuesta de mejora” presentado en la Universidad Pontificia Católica del Perú” su objetivo principal fue Modelar, simular y diagnosticar el circuito actual de ventilación de la mina subterránea utilizando el software Ventsim Design 5 y proponer un escenario viable de mejora. La metodología utilizada fue aplicativa, donde El ahorro en los costos de energía para los ventiladores resultó en una reducción del caudal suministrado por estos dispositivos; sin embargo, esto no implicó una disminución en la cantidad de aire que ingresaba al circuito. Esto se logró gracias a la realización de bloqueos y tareas de limpieza, así como a la reubicación, instalación y retiro de ventiladores en las áreas necesarias, estas acciones garantizaron una menor pérdida de caudal por fugas. La propuesta técnica de mejora permitió reducir el costo de energía de los ventiladores en un 47%, mediante el ajuste del caudal circulante en cada nivel según los requerimientos y cumpliendo con las normativas vigentes. Es importante señalar que esta reducción en los costos no comprometió la cobertura del aire ni afectó la calidad del aire suministrado al circuito.

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

c) **Antecedentes Locales**

Vera (2019), en su trabajo de investigación titulada "Implementación y simulación del sistema de ventilación con el software Ventsim visual en la mina San Valentín S.A. – Curahuasi – Apurímac - 2019" presentada en la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, como objetivo principal fue optimizar la ventilación mediante la evaluación de la cobertura de aire con Ventsim visual, con este trabajo se ha logrado mejorar el ambiente de trabajo, aumento de la producción, diseño de sistema de ventilación y en una de sus recomendaciones menciona utilizar software de ventilación para realizar una evaluación del sistema de ventilación de la mina, teniendo en cuenta el uso de ventiladores y los costos de energía, también indica que la ventilación debe controlarse estrechamente y evaluarse en consecuencia para lograr un uso económicamente racional de la ventilación.

Loayza (2021), en su trabajo de investigación titulada "Optimización del sistema de ventilación a corto plazo en la Unidad Operativa Pallancata – Ayacucho" presentado en la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, este estudio se enfoca en U. M. Pallancata, perteneciente Compañía Ares S.A.C. una mina con vetas variantes 0.3 – 3.0 m. de potencia, productora de plata con normas 254 g/TM y oro con leyes 1.82 g/TM, situado en la comunidad campesina de Pallancata, distrito coronel Castañeda, provincia Parinacochas departamento Ayacucho. El tiempo útil de la mina, expande en 3 años hasta 2021, especialmente basado principalmente en la zona de explotación Pablo, es más tiene un problema considerable y cobertura de ventilación de (56% en la actualidad), es importante definir los nuevos ejes de ventilación logrando cubrir al 100% de los requerimientos. Partiendo desde una línea base de una validación de datos y bajo el soporte de software Ventsim TM Design 5.1, que nos permite simular un sistema de ventilación presente y desarrollar soluciones y alternativas a corto y a mediano plazo es más los diseños de ventilación auxiliar permite los análisis (identificar el tamaño y numero de ventiladores tanto el lugar y dimensiones optimas de chimeneas) anteriormente de su realización, Por tanto, se desea lograr un sistema flexible, positivo y financiero, impidiendo de este cualidad de gastos innecesarios en la ejecución de chimeneas de diámetros inadecuados, además es muy necesario identificar la ubicación de las zonas donde se ubica los labores del plano teniendo en cuenta la calidad de la roca Rock Mass Rating (RMR) superior a 30 y evitar la selección e instalación de ventiladores fuera de su curva de operación.

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

3.2 Aspectos generales

3.2.1 Características climáticas

Clima

El clima de Andahuaylas es templado y agradable, con una clara distinción entre la temporada seca y la de lluvias. Durante el día, las temperaturas son moderadas, mientras que las noches suelen ser frías. De mayo a principios de diciembre, el clima es seco y fresco, mientras que de diciembre a abril se caracteriza por ser frío y lluvia.

Temperatura

El diagrama de temperaturas máximas y mínimas en Andahuaylas muestra la cantidad de días por mes en los que se alcanzan ciertos niveles de temperatura.

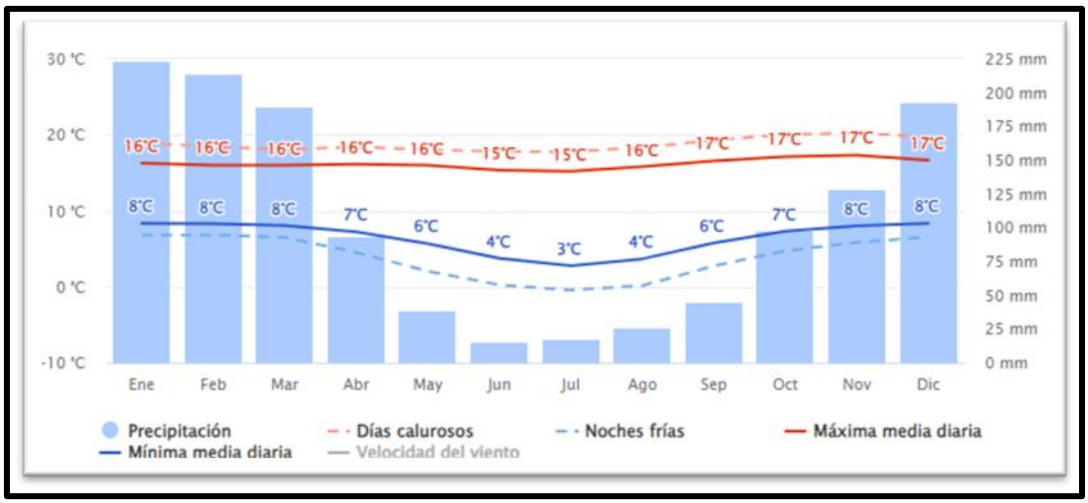


Figura 2 — Diagrama de temperaturas máximas y mínimas de todo el año

Fuente: Meteoblue, datos climáticos y meteorológicos históricos simulados, accedido 27/09/2024

La "temperatura máxima diaria promedio" (línea roja continua) representa el valor medio de las temperaturas más altas registradas en un día a lo largo de cada mes en Andahuaylas. De manera similar, la "temperatura mínima diaria promedio" (línea azul continua) refleja el promedio de las temperaturas más bajas. Las líneas discontinuas, tanto azules como rojas, indican las temperaturas del día más caluroso y la noche más fría de cada mes durante los últimos 30 años.

Humedad

En la región, la humedad relativa llega al 70%, lo que propicia la aparición de fenómenos climáticos como la garúa y las granizadas, particularmente durante los meses de enero a marzo. Esto ocurre debido a los altos niveles de humedad, que,

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

junto con las condiciones atmosféricas características de la temporada de lluvias, generan estas manifestaciones climáticas.

Precipitaciones

En cuanto a las precipitaciones tenemos fenómenos eléctricos acompañados de lluvias intensas comienzan en los meses de diciembre, enero, febrero, marzo y abril, coincidiendo con la temporada de invierno.

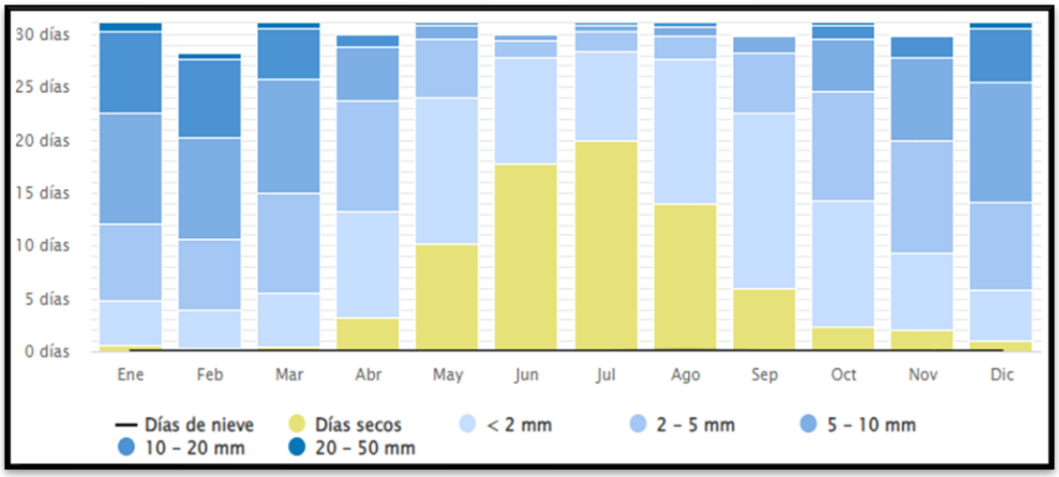


Figura 3 — Precipitaciones de todo el año

Fuente: Meteoblue, datos climáticos y meteorológicos históricos simulados, accedido 27/09/2024.

Presión atmosférica

La altitud provoca una presión baja y constante, estas variaciones, además de aumentar el riesgo de ciertas enfermedades, generan dificultades en las comunidades cercanas al proyecto. Uno de los problemas más graves es la inaccesibilidad temporal debida al exceso de lluvias, lo que interrumpe las vías de comunicación.

Flora

La vegetación de la zona es típica de los Andes, con diversas formaciones que van desde la puna hasta áreas de matorrales. Predominan asociaciones de gramíneas y plantas herbáceas. La flora natural está compuesta principalmente por gramíneas dispersas, conocidas como "ichu", que forman grandes extensiones de pastizales en la puna, acompañadas por arbustos aislados. No se observan campos de cultivo en esta área.

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

Fauna

También encontramos mamíferos silvestres como domésticos. Entre los animales más destacados se encuentran el "zorro andino" (Lycalopex culpaeus) y el "puma", ambos con una distribución bastante amplia en la región. También habitan otras especies de mamíferos y aves, como el venado, la perdiz y la huallata, entre otros.

3.2.2 Características geológicas

3.2.2.1 Geología regional

Acosta Ale (2021), en el área afloran secuencias de rocas sedimentarias conformadas por secuencias de Calizas con intercalación de lutitas que corresponden a la Formación Ferrobamba de edad Cretaceo Superior, esta secuencia se encuentra deformada, plegada formando anticlinales y sinclinales, cortada por cuerpos intrusivos de granodiorita, cuarzo monzodiorita que corresponden al batolito Andahuaylas-Yauri del Eoceno-Oligoceno.

La región de Andahuaylas se encuentra en una zona tectónicamente activa, con la presencia de grandes unidades geológicas que se extienden por el área. Estas unidades incluyen formaciones como los complejos metamórficos de la Cordillera de los Andes, que pueden influir en la estabilidad de las minas y en la interacción con el sistema de ventilación. La comprensión de estas unidades geológicas permite anticipar cómo pueden afectar la dinámica interna de la mina y la eficiencia del sistema de ventilación.

La actividad tectónica en la región, incluida la presencia de fallas geológicas y la actividad sísmica, tiene implicaciones importantes para las operaciones mineras. Las tensiones tectónicas pueden afectar la estabilidad de las galerías y, por ende, el funcionamiento del sistema de ventilación. Es crucial considerar estos factores para diseñar un sistema de ventilación que pueda resistir y adaptarse a las condiciones tectónicas de la región.

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

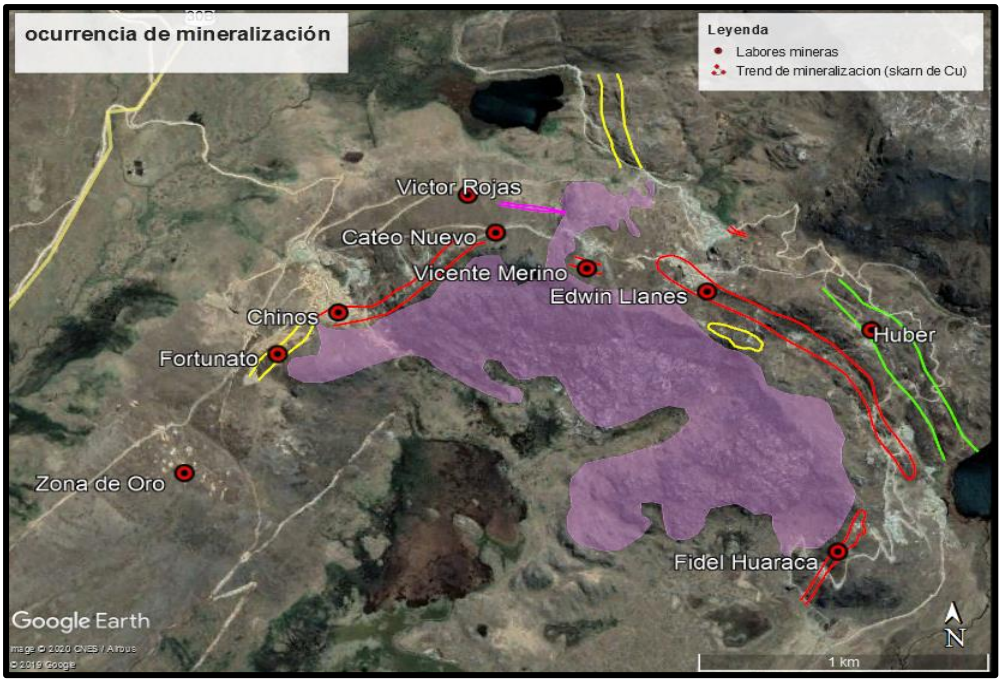


Figura 4 — Ocurrencias de la mineralización que se emplaza alrededor del intrusivo

Fuente: Área de Geología U.M ARE S.A.C

3.2.2.2 Estructuras geológicas

Acosta Ale (2021), la región presenta una serie de estructuras geológicas significativas, como fallas, pliegues y fracturas, que influyen en la estabilidad de las galerías mineras y en el comportamiento del flujo de aire. Las fallas pueden actuar como caminos preferenciales para el movimiento del aire y los contaminantes, mientras que las fracturas pueden afectar la circulación del aire y permitir la acumulación de gases peligrosos. La identificación y caracterización de estas estructuras son esenciales para diseñar un sistema de ventilación que minimice los riesgos y optimice el control ambiental.

Litología y formación Rocosa

La mina Milagros está emplazada en una región donde predominan formaciones rocosas de tipo ígneo y metamórfico. Las unidades litológicas incluyen rocas como granitos, dioritas y esquistos, que presentan una considerable heterogeneidad en términos de permeabilidad y resistencia. Estas características litológicas impactan directamente en la ventilación subterránea; las rocas de baja permeabilidad pueden dificultar el flujo de

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

aire, creando zonas con acumulación de gases y polvos tóxicos que requieren atención especial en el diseño del sistema de ventilación.

3.2.2.3 Geología local

La alteración y mineralización está asociada a los cuerpos de skarn, se encuentran conformados por granates, piroxenos, calcita y ocurren con mineralización de magnetita, pirrotita, pirita calcopirita, especularita; presentándose en forma masiva, bandas, parches y diseminada, adyacente a los cuerpos de skarn se aprecia Hornfels probablemente formado en secuencias de areniscas y lutitas que hospedan mineralización incipiente de Pirita diseminada, pasando finalmente a roca inalterada. Los intrusivos de composición cuarzo diorita presentan débil a moderada cloritizacion de ferromagnesianos con mineralización diseminada de pirita-calcopirita.

Hidrogeología Local

En cuanto a las condiciones hidrogeológicas, la mina Milagros se enfrenta a la presencia de aguas subterráneas que pueden impactar la ventilación. La infiltración de agua en las galerías puede incrementar la humedad del aire, complicando la gestión de la ventilación. Además, el manejo de aguas subterráneas es crucial para evitar problemas asociados a la acumulación de agua y la formación de vapor, que pueden afectar la calidad del aire y la seguridad en las operaciones

3.2.2.4 Geología Económica

Es un yacimiento de tipo skarn, rico en cobre y con presencia de oro y plata. La mineralización identificada hasta ahora está vinculada a dos tipos de formaciones: una asociada a la alteración de granates pardos con cobre, y otra relacionada con magnetita y cobre. Estas formaciones crean cuerpos mineralizados que se encuentran dentro del intrusivo, conocidos como endoskarn, y en el contacto entre rocas carbonatadas e intrusivas, denominado exoskarn. Los principales minerales de interés económico que se observan son malaquita, cuprita, calcopirita, y en menor proporción, covelina y calcosina.

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

Mineralización

En ella se encuentran diques aplíticos y andesíticos, junto con xenolitos, donde predomina una asociación mineral de pirita y calcopirita. Además, aparecen minerales como bornita y calcosina, y en la superficie se pueden observar carbonatos como malaquita y azurita. El mineral principal a extraer es la calcopirita, con concentraciones de cobre que varían entre 1% y 2.5%, siendo la ley de cabeza aproximadamente del 1.5% de cobre.

Minerales de Mena

Minerales que presentan beneficio económico.

- Calcopirita
- Bornita
- Calcosina
- Covelina

Minerales Ganga

Minerales que no presentan beneficio económico.

- Cuarzo
- Granate
- Limonita
- Calcita

3.3 Aspectos generales de la mina

3.3.1 Descripción de la mina

La mina Milagros fue operada inicialmente por mineros artesanales, quienes realizaron una excavación en dirección al cuerpo mineralizado sin mucho éxito. Debido a limitaciones económicas, se vieron obligados a paralizar la mina. A fines del año 2021, la empresa Americana Real Estate S.A.C. intervino, y como primera operación se amplió la sección de la galería de 1.5 m * 1.8 m. Con la empresa, se realizó un trabajo de desquinche una longitud de 125 metros, ampliando la sección a 2.7 m * 2.7 m, y continuando la excavación en dirección al cuerpo mineralizado por 300 metros. Con esta longitud, se alcanzaron las alteraciones entre el cuerpo mineralizado y la roca ígnea, en donde se implementó el método de circado.

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

El acarreo se realiza con scooptram de 2.5 yardas cúbicas hasta la bocamina, donde se encuentra la cancha de mineral. Este traslado se efectúa en dos tramos: primero, hasta la cámara de acumulación y luego hasta la cancha de mineral, desde donde se carga al volquete de 15 cubos.

3.3.2 Método de explotación

Los métodos de explotación empleados en este proyecto son el corte y relleno, en su versión convencional ascendente, y el método de circado.

Corte relleno ascendente

En este método de explotación, el mineral se extrae en franjas horizontales, comenzando desde la galería o subnivel en el nivel inferior y avanzando verticalmente hacia el nivel superior. Una vez que se ha completado la extracción de una franja (o corte), el tajo se rellena con material detrítico, que funciona como piso de trabajo para el siguiente corte, y a la vez sirve para sostener las paredes de las zonas ya explotadas.

Circado

El circado de mineral se obtiene con el desbroce de desmonte de cualquier tipo de labor, y consiste en mantener el filón o manto aurífero adosado a la caja techo o piso de la labor que se ejecute.

3.3.3 Campamento

El campamento está ubicado a dos kilómetros de la bocamina y cuenta con viviendas de material prefabricado. Ofrece servicios básicos como agua, letrinas, electricidad e internet. Tiene capacidad para alojar a 40 personas, con habitaciones de diferentes tamaños, distribuidas en áreas como oficinas, dormitorios, cocina-comedor y almacenes.

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

Figura 5 — Campamento de la unidad minera

Fuente: Propio del autor

3.3.4 Recurso humano

La unidad minera American Real Estate SAC cuenta actualmente con personal calificado, teniendo en su planilla un promedio de 50 trabajadores, entre maestros perforistas, ayudantes de perforista, operadores de scoop, operadores de volquete y personal administrativo, tanto hombres como mujeres.

3.4 Marco teórico

3.4.1 Ventilación

Según el reglamento de seguridad y salud ocupacional en minería DS N° 034 - EM (2023), todas las explotaciones mineras deben disponer de ventilación de aire limpio para satisfacer las exigencias de los trabajadores, los equipos y eliminar gases, humos y polvo en suspensión que puedan perjudicar la salud del trabajador, todos los sistemas de ventilación en lo que respecta a la calidad del aire, deben mantenerse por debajo de los siguientes niveles máximos permisibles si en caso que pudiera exceder podría repercutir en la salud de los trabajadores. Los límites máximos permisibles (LMP) de los agentes químicos medidos en el punto de emisión, será el siguiente:

a) Polvo inhalable:10 mg/m^3

b) Polvo respirable: 3 mg/m^3

c) Oxígeno (O_2): mínimo 19.5%

d) Dióxido de carbono (CO_2): máximo 9000 mg/m^3ó 5000 ppm.

e) Monóxido de Carbono (CO): máximo 29 mg/m^3ó 25 ppm.

f) Metano (NH_4): máximo 5000 ppm.

g) Hidrogeno Sulfurado (H_2S): máximo 14 mg/m^3ó 10 ppm.

h) Gases nitrosos (NOx): máximo 07 mg/m^3ó 5ppm.

i) Anidrido sulfuroso (SO_2): máximo 5 ppm.

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

j) Aldeídos: máximo 5 ppm.

k) Hidrogeno (H): máximo 5000 ppm.

l) Ozono: máximo 0.1 ppm.

En todas las operaciones mineras subterráneas, se mantendrá una circulación de aire limpio y fresco en cantidad y calidad suficientes, de acuerdo con el número de personas, la potencia total de los equipos con motores de combustión interna, así como para la dilución de los gases que permita tener en el ambiente de trabajo un mínimo de 19.5% y un máximo de 22.5% de oxígeno, cuando el lugar de trabajo se encuentra menor a 1500 metros sobre el nivel del mar la cantidad mínimo de aire por persona será de 3 m³/minuto, en otras altitudes de trabajo será de acuerdo a la siguiente escala como indica en la siguiente figura:

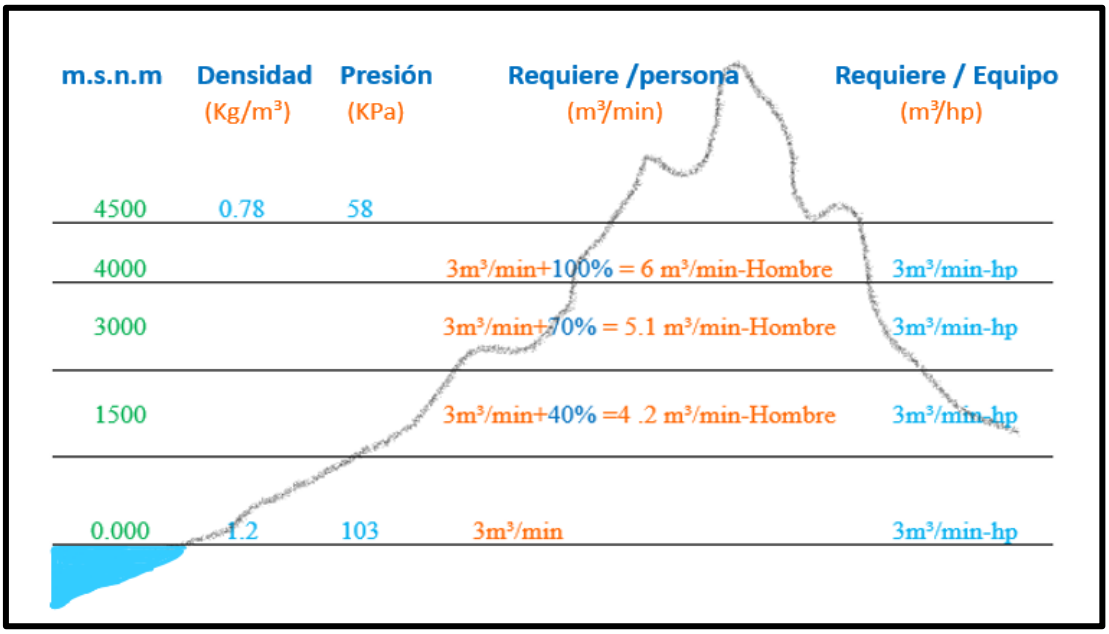


Figura 6 — Cantidad de aire según la altitud del trabajo

Fuente: Ministerio de Energía y Minas D.S N° 034 (2023).

3.4.2 Necesidad de ventilación

Andrade (2008), es crucial asegurar un nivel mínimo de oxígeno en la atmósfera dentro de la mina para garantizar la respiración adecuada de los trabajadores. En el ambiente minero, se emiten distintos tipos de gases, cuya naturaleza depende tanto del mineral extraído como de la maquinaria utilizada. Estos gases pueden ser tóxicos, asfixiantes o incluso explosivos, por lo que resulta indispensable diluirlos hasta que estén por debajo de los límites legales permitidos. Existen dos categorías principales.

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

- Ventilación natural
- Ventilación mecánica

Dentro de los tipos de ventilación de una mina existe la ventilación mixta o combinada cómo es impelente y aspirante, en la impelente el ventilador impulsa el aire al interior de la mina o por la tubería, en el caso de aspirante el ventilador succiona el aire del interior de la mina por la tubería y lo expulsa al exterior, el caudal requerido será calculado:

- De acuerdo por número de personas
- Requerimiento de aire por consumo de madera
- Requerimiento de aire por temperatura en labores de trabajo
- Requerimiento de aire por equipo con motor petrolero
- Requerimiento de aire por consumo de explosivo

3.4.2.1 Ventilación natural

Andrade (2008), menciona que este tipo de ventilación es cuando se permite la entrada y salida del aire exterior a interior mina favoreciendo la circulación sin que intervengan factores mecánicos, la ventilación es favorable cuando las labores mineras son pocas profundas. Y para que se produzca un flujo de aire natural en la misma es necesario que exista diferencia de presiones.

3.4.2.2 Ventilación mecánica

Jiménez (2011), menciona que normalmente son generados por equipos electromecánicos las cuales ayudan a incrementar el caudal de aire y por consiguiente vencer las resistencias presentes en interior mina, al estar accionadas por un motor eléctrico y elegidas en función del diseño del sistema de ventilación para garantizar el ritmo de las operaciones y de los ciclos de trabajo, las ventilaciones mecánicas permiten mantener una presión constante sobre el aire y un cierto volumen fijo, este tipo de ventilación se utilizan cuando las labores mineras son de gran profundidad y que requieran un caudal adecuado para tener óptimas condiciones de trabajo ya sea para el equipo y personal.

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

3.4.3 Ventilación subterránea

Cuadra (1974), la ventilación de una mina subterránea garantiza que haya suficiente aire respirable y un entorno seguro en el interior de la mina, la ventilación se realiza estableciendo un circuito para la circulación del aire a través de todas las labores.

3.4.3.1 Requerimiento de aire total

Rueda et al. (2012), la concentración de gases admisibles en el aire que circula por la mina viene definida por la calidad del aire. Además, es crucial recordar que por los distintos niveles y frentes de trabajo debe circular aire limpio considerando la formula siguiente.

$$Q_{To} = Q_{T1} + Q_{Fu} \qquad \text{Ec.(1)}$$

Donde:

Qto = Caudal total para la operación

QT_1 = La suma total del caudal requerido por:

a) Número de trabajadores de la guardia más numerosa (QTr)

b) Consumo de madera (QMa)

c) Temperatura en labores de trabajo (QTe)

d) Equipos con motor petrolero (QEq)

e) Consumo de explosivo (QEx).

QFu = 15% del QT_1

3.4.3.2 Requerimiento de aire por personal

Por encima de 4248 m.s.n.m de acuerdo al Ministerio de Energía y Minas D.S N° 034 - EM (2023), es 6 m³/minuto- hombre.

$$Q_{Tr} = F\ x\ N\ (m^3/min) \qquad \text{Ec. (2)}$$

Donde:

QTr = Caudal total para “n” trabajadores (m³/min)

F = Caudal mínimo por persona de acuerdo a la escala establecida en el artículo 247 del reglamento de seguridad y salud ocupacional en minería.

N = Número de trabajadores de la guardia más numerosa.

3.4.3.3 Requerimiento de aire por consumo de madera

$$Q_{Ma} = T\ x\ u\ (m^3/min) \qquad \text{Ec. (3)}$$

Donde:

QMa = Caudal requerido por tonelada de producción (m³/min)

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

u = Factor de producción, de acuerdo a la tabla N° 5

T = Producción de toneladas métricas húmedas por guardia.

Tabla 5 — Factor de producción de acuerdo al consumo de madera

Consumo de madera (%)	Factor de producción (m³/min)
<20	0
20 a 40	0.6
41 a 70	1
>70	1.25

Fuente: Reglamento de seguridad y salud ocupacional en minería DS N° 034 - EM (2023).

3.4.3.4 Requerimiento de aire por temperatura en labores de trabajo

$$Q_{Te} = V_m x\ A\ x\ N\ \ (m^3/min) \qquad \text{Ec. (4)}$$

Donde:

QTe = Caudal por temperatura (m³/min)

Vm = Velocidad mínima

A = Área de la labor promedio

N = Numero de niveles con temperatura mayor 23 °C.

Tabla 6 — Velocidad mínima

TEMPERATURA SECA (°C)	VELOCIDAD MÍNIMA (m/min)
<24	0
24 a 29	30

Fuente: Reglamento de seguridad y salud ocupacional en minería DS N° 034 - EM (2023).

3.4.3.5 Requerimiento de aire por equipo con motor diesel

$$Q_{Eq} = 3\ x\ HP\ x\ D_m x\ F_u\ (m^3/min) \qquad \text{Ec. (5)}$$

Donde:

QEq = Volumen de aire necesario para la ventilación (m³/min)

HP = Capacidad efectiva de potencia (HPs)

Dm = Disponibilidad mecánica promedio de los equipos (%)

Fu = Factor de utilización promedio de los equipos (%)

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

3.4.3.6 Requerimiento de aire por consumo de explosivo

$$Q_{Ee} = A\ x\ V\ x\ N\ \ (m^3/min)$$ Ec. (6)

Donde:

QEx = Caudal de aire requerido por consumo de explosivo detonado (m^3/min)

A = Área promedio de labores (m^2)

V = Velocidad mínima requerida según la norma (m/min)

N = Numero de niveles en voladura

3.4.3.7 Requerimiento de aire por fugas

En este caso, el caudal debido a las fugas representa solo el 15% del caudal total necesario según lo establecido por el reglamento de seguridad y salud ocupacional.

3.5 Ventiladores

Los ventiladores primarios como los secundarios son piezas clave en el sistema de ventilación: los primeros establecen el flujo general desde la superficie, y los segundos aseguran que el aire llegue a interior mina eficazmente a los puntos críticos.

La carcasa, el rodete y el motor forman el ventilador, que se considera el componente activo del conjunto, Aires Limpio Global (2007).

Los tipos de ventiladores utilizados son:

- Axiales o de hélice
- Centrífugos o Radiales

3.5.1 Ventiladores axiales

Menciona que existen numerosos usos para los ventiladores de hélice cuando hay poca resistencia al flujo de aire. Suelen utilizarse en lugares sin sistemas de conductos o con conductos de longitud limitada. En la mayoría de los casos, impulsa el aire a través de un orificio en la pared. Su ventaja competitiva fundamental es la rentabilidad con la que proporcionan grandes volúmenes de aire y la ausencia de importantes gastos de construcción. Se utilizan para la ventilación general en todo el mundo. También pueden servir como ventilador de inyección y como extractor.

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

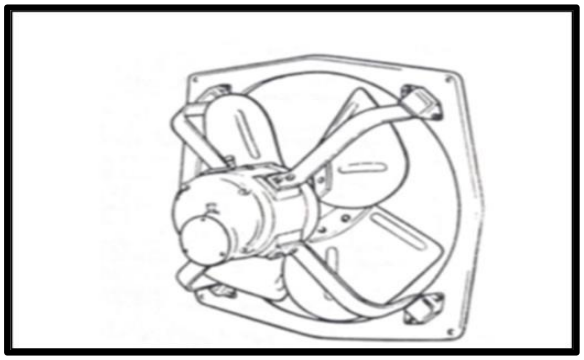


Figura 7 — Hélice de ventilador

Fuente: Aires Limpio Global (2007).

3.5.2 Ventilador centrifugo

Aires Limpio Global (2007), menciona que un ventilador centrífugo está formado por un rodete que se mueve en el interior de una voluta o caracol tal como se muestra en la figura 8.

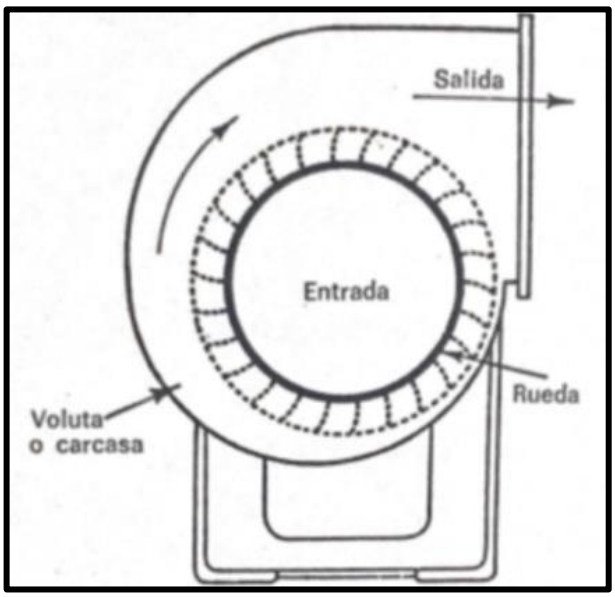


Figura 8 — Interior de una ventiladora

Fuente: Aires Limpio Global (2007)

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

El impulsor está rodeado por una serie de álabes o placas, de forma muy parecida a una rueda hidráulica o de paletas de un barco fluvial. La carcasa presenta una salida paralela al eje de la rueda y una entrada situada en el eje de la rueda como se muestra en la figura N° 9.

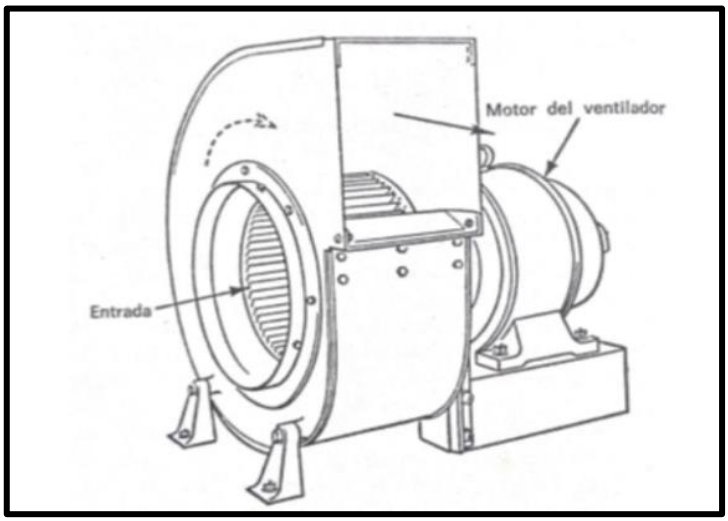


Figura 9 — Carcasa de una ventiladora

Fuente: Aires Limpio Global (2007)

El impulsor gira, liberando centrífugamente aire en el sentido de rotación a través de las hélices que lo rodean. Tan pronto como el aire sale del impulsor, es conducido a la voluta y a la salida. En la entrada se aspira aire para sustituir al que ha salido previamente en el mismo momento.

El aire entra axialmente, gira a través de las aletas en ángulo y sale radialmente. La función de la carcasa es transformar la presión estática en la presión dinámica que se crea en las puntas de las aletas.

3.5.3 Software de ventilación

3.5.3.1 Software ventsim

Savedra Bustamante (2017), menciona que el software Ventsim se introdujo por primera vez en las operaciones mineras en 1994; además de optimizar visualmente los sistemas de ventilación subterránea, ahora se utiliza en más de 1,000 empresas mineras, consultores, universidades, gobiernos y organizaciones de investigación de todo el mundo.

Craig Stewart (2018), Se trata de un software de simulación de ventilación para minas subterráneas, creado para modelar y simular aspectos como

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

flujos de aire, presiones, calor, gases y aspectos financieros. Este programa fue desarrollado para facilitar el diseño, la mejora y la optimización visual de los sistemas de ventilación subterránea.

Las principales características de Ventsim incluyen: modelado 3D completo con opciones de rotación suave, zoom y desplazamiento; animación en tiempo real de los conductos de ventilación y ventiladores; simulación de estos conductos y ventiladores; propagación básica de contaminantes, suministros y simulaciones de emergencias; y la capacidad de importar líneas centrales y elementos sólidos de archivos CAD (DXF), para construcción rápida de redes de ventilación.

Teoría en que se basa el Ventsim fundamentalmente son:

- Ley de Kirchoff
- Método de Hardy Cross
- Ley de Atkinson
- Ley cuadrática

3.5.3.2 Ley de Kirchoff

Rivera (2020), Se puede hacer una comparación entre los caudales de aire y las caídas de presión con la corriente y la tensión, respectivamente, en los circuitos eléctricos. De esta manera, las leyes de Kirchhoff también se aplican a los circuitos de ventilación.

a) Primera ley de Kirchhoff (ley de la continuidad)

En las redes de ventilación de minas, la primera ley de Kirchhoff establece que la suma algebraica de todos los flujos de aire en cada punto o nodo debe ser cero. Esto significa que la cantidad total de aire que entra es igual a la cantidad de aire que sale.

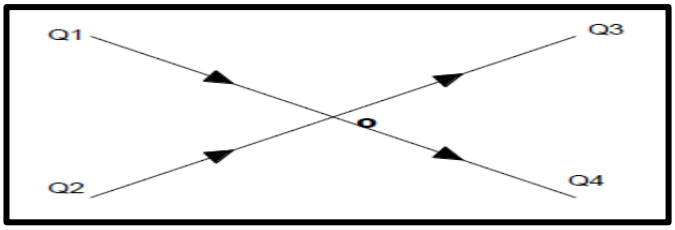


Figura 10 — Primera ley de Kirchhoff

Fuente: Rivera (2020)

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4 \qquad \text{Ec. (7)}$$

b) Segunda ley de Kirchhoff

De forma similar, la segunda ley de Kirchhoff establece que el total algebraico de las caídas de presión de todas las ramas de la integral de una malla es igual a cero.

Esta ley nos dice que: la suma de todas las pérdidas de energía en los tramos que conforman un anillo cerrado es igual a cero.

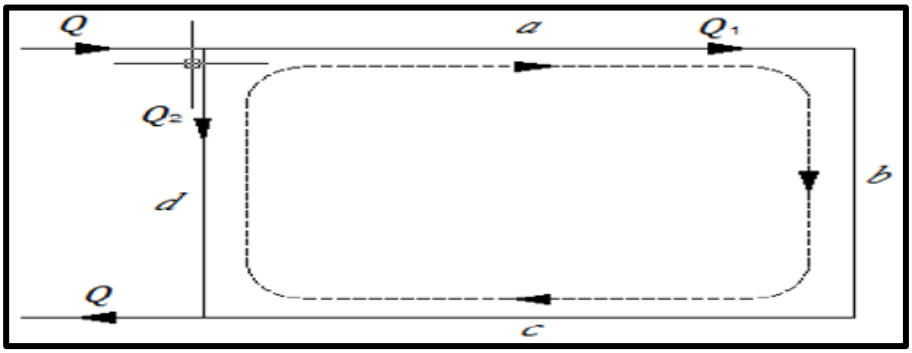


Figura 11 — Segunda ley de Kirchhoff

Fuente: Rivera (2020)

$$\Sigma \boldsymbol{P} = \mathbf{0} \qquad \text{Ec. (8)}$$

$$\boldsymbol{PT} = \boldsymbol{Pa} + \boldsymbol{Pb} + \boldsymbol{Pc} - \boldsymbol{Pd} = \mathbf{0} \qquad \text{Ec. (9)}$$

3.5.3.3 Método de Hardy Cross

El método de simulación que emplea Ventsim Visual para calcular los caudales en un modelo utiliza un enfoque iterativo que ajusta los caudales hasta que los errores de estimación estén dentro de los márgenes aceptables. Este proceso se basa en un método modificado que considera.

El método más utilizado en la simulación de circuitos de ventilación es el desarrollado por Hardy Cross. Esta técnica iterativa tiene en cuenta el flujo de aire que circula a través de un conducto con resistencia, en el cual se cumple una relación específica. Claverias (2014).

$$\Delta QP = RQ^2 \qquad \text{Ec. (10)}$$

Donde ΔQ representa el error en el valor asumido de Qa. El desafío ahora es determinar el valor de ΔQa que debe aplicarse al valor estimado de Qa.

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

En el caso de los conductos de aire en una mina, estos no se encuentran de manera aislada, sino que están integrados en una red de conductos cuya magnitud también

$$Q = Qa + \Delta Q \qquad \text{Ec. (11)}$$

Donde ΔQ sería el error cometido al asumir un valor de Q que no es el valor verdadero. Del mismo modo, ΔP sería el error cometido en el cálculo de la caída de presión real p. El problema consiste, por lo tanto, determinar el valor de la corrección ΔQ que habrá que aplicar a Qa, para encontrar el valor real del caudal Q.

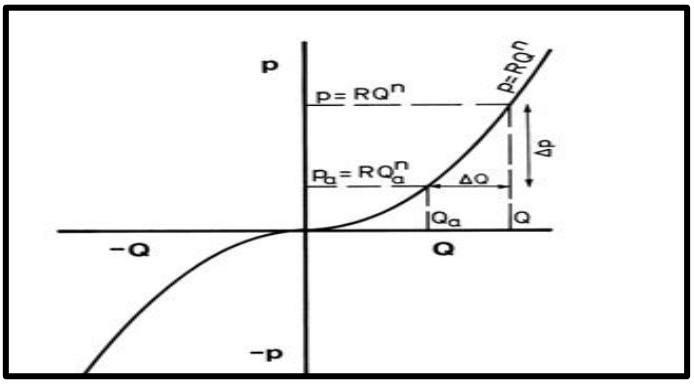


Figura 12 — Gráfico de la presión

Fuente: Rivera (2020)

En este gráfico, la curva que corresponde a la ecuación P = RQn representa al caudal a lo largo del conducto a través del cual está circulando el fluido, a la que se denomina curva de la característica del sistema.

3.5.3.4 Ley de Atkinson

Rivera (2020), el valor de la resistencia (R) depende de determinadas características del conducto de ventilación, por ejemplo, si uno de los conductos de aire tiene un área pequeña y otro tiene un área grande, todos los conductos de aire tendrán la misma resistencia (R); si uno de los conductos de aire tiene un área pequeña y otro grande, todos los factores son constantes. Esta fórmula fue desarrollada en 1850 por un ingeniero de minas inglés llamado John Atkinson.

La fricción de los conductos de ventilación provocada por el paso del flujo de aire, la sección transversal, la longitud del conducto y el caudal que

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

circula por él son factores que la fórmula de Atkinson tiene en cuenta. A continuación, estos factores se ven afectados por la superficie y la densidad del aire de la mina, el tamaño y la densidad del aire de la mina.

$$H = \frac{KPLQ^2}{A^3} * \frac{\delta}{1.2} \qquad \text{Ec. (12)}$$

Donde:

H: Perdida de presión (Pa)

P: Perímetro (m)

L: Longitud (m)

A: Área (m^2)

K: Factor de fricción (Ns^2/m^4)

Q: Caudal (m^3/s)

δ: Densidad de aire (kg/m^3)

$$R = \frac{KPL}{A^3} \qquad \text{Ec. (13)}$$

Donde:

R: Resistencia (Kg/m^2)

P: Perímetro (m)

L: Longitud (m)

A: Área (m^2)

K: Factor de fricción (Ns^2/m^4)

Factor de presión

Los componentes de (K) se establecen a partir de mediciones directas en diversos conductos y galerías, teniendo en cuenta también el tipo de roca, la sinuosidad del conducto y otros parámetros, como el tipo de roca.

Es difícil adquirir en las galerías, por lo que se hace mediante una tabla compleja, cuya densidad debe ajustarse para conseguir K corregido a la altitud de la mina. También hay que ajustar la densidad del aire en la mina.

K ajustado al nivel de la mina que se va a obtener Jiménez (2011).

K corregido = K (δ /1.2)

Dónde:

K: Factor de fricción de tablas (Ns^2/m^4)

δ: Densidad del aire Kg/m^3

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

3.5.4 Herramientas del Software Ventsim

El software Ventsim proporcionar al usuario las herramientas para:

a) Simular y entregar un registro de caudales y presiones en una mina existente.
b) Ejecutar simulaciones de casos hipotéticos para nuevos desarrollos planificados.
c) Ayudar en el planeamiento a corto y largo plazo de los requerimientos de la ventilación.
d) Asistir en la elección de los tipos de circuitos de ventiladores para la ventilación de la mina.
e) Asistir el análisis financiero de las diferentes opciones de ventilación.
f) Simular la distribución y concentraciones de humo, polvo o gas, para el planeamiento de la mina o en situaciones de emergencia.

3.5.5 Características del Ventsim

- Soporta hasta 30,000.00 ramales individuales.
- 1,000.00 diferentes tipos de ventiladores, con su eficiencia puede ser modelado dentro la red.
- Las redes se pueden crear a escala real en 3D simplemente dibujando ramales con el clic del ratón
- La rotación en 3D permite la rotación real para ayudar en la visualización y la creación de ramales.
- Simulación de contaminantes de humo gases u otros contaminantes

3.5.6 Condiciones de trabajo

Tener una buena condición de trabajo en esta mina es de mucha importancia para seguir explotando el recurso valioso de la manera más adecuada y sostenible, caso que en esta mina Milagros los trabajadores y equipos no desarrollan sus actividades adecuadas, por las condiciones que se encuentra ahora.

La tecnología es de mucha importancia que nos facilita a diseñar e incluso a simular de acuerdo a los parámetros de la mina y de esta manera se diseña una ventilación más óptima, para que la producción y la eficiencia de los trabajadores sean óptimas. Chávez (2010), Menciona que cada entorno de trabajo es una comunidad, los beneficios de la seguridad y la salud en el trabajo incluyen una mayor productividad y una menor rotación del personal, las empresas de más éxito se forjan una reputación no sólo con un producto de primera, sino también con un entorno de

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

trabajo de primera en el que se da prioridad a la seguridad y la salud, cada empleado se beneficia cuando la seguridad y la salud son una prioridad en el lugar de trabajo.

3.5.7 Caudal de aire

Vargas (2014), la cantidad de aire que circula a través de una sección, está relacionada según la ecuación:

$$Q = A * V \qquad \text{Ec. (14)}$$

Dónde:

A: Área de la sección transversal de la labor o ducto (m^2).

V: Velocidad de aire que atraviesa dicha sección (m/min).

3.5.8 Velocidad de aire

Ministerio de Energía y Minas D.S N° 023 - EM (2019), menciona en el artículo 248 que en ningún caso la velocidad del aire será menor de veinte metros por minuto (20 m/min) ni superior a doscientos cincuenta metros por minuto (250 m/min) en las labores de explotación, incluido el desarrollo y preparación. Cuando se emplee explosivo ANFO u otros agentes de voladura, la velocidad del aire no será menor de veinticinco metros por minuto (25 m/min).

3.5.9 Densidad del aire

La densidad del aire estándar considerada al nivel de mar es 1,2 kg/m³, la densidad del aire a diferentes alturas, depende de la presión barométrica en el lugar de trabajo y la temperatura. Fórmula recomendada por el Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM):

$$\rho = 0.0749 lb/pie^3 \ x \ e^{\left(\frac{-H}{29.2699\,x\,T+7995.0852}\right)} \qquad \text{Ec. (15)}$$

Donde:

ρ: Densidad del aire a "h" m.s.n.m en lb/pie³

ρs: Densidad de aire al nivel del mar = 0.0749 lb/pie³

e: Coeficiente = 2.71828182

h: Altitud (m)

T: Temperatura (C°)

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

3.6 Presión del aire en altura

La presión es una propiedad física del aire que interviene en los diferentes procesos de ventilación de una mina. Se define como el empuje que ejerce un fluido sobre las paredes que lo contiene.

Fórmula recomendada por el Comité Internacional de Pesas y Medidas

$$logP_2 = \log P_1 - \frac{H}{122.4(°F+460)} \qquad \text{Ec. (16)}$$

Dónde:

P_2: Presión atmosférica a la altura del punto de entrada (lbs/pul^2), mm. de Hg, pul. de Hg

P_1: Presión atmosférica al nivel del mar (14,7 lbs/pul^2), 760 mm. de Hg., 29,92 pul. de Hg

H: Altura del punto de entrada (pies).

°F: Temperatura en (°F) a la altura del punto de entrada.

3.7 Circuito de ventilación

Rivera (2020), menciona que los cálculos de los caudales y las velocidades en las labores de una mina requiere la aplicación del análisis de circuitos. Esto incluye el uso de técnicas matemáticas para analizar la resistencia de la mina con el fin de planificar, gestionar y controlar la ventilación.

En ventilación de minas hay dos tipos de combinación de galerías por donde fluye el flujo de los sistemas de ventilación; y son flujos en serie a través de galerías en línea y flujos en paralelo a través de galerías en bifurcaciones hacia paralelo y ambas se acoplan una después de la anterior formando una red, la cual tiene que ser calculada en volúmenes y resistencias para conocer la resistencia o estática total de la red y sus volúmenes y poder pedir el ventilador adecuado.

3.7.1 Flujo de aire

SERNAGEOMIN (2008), menciona que la circulación de aire en una mina, conocida como flujo de aire, ocurre cuando existe una diferencia de presión entre dos puntos, como la entrada y salida de los conductos de aire. El aire siempre se desplaza desde el área de mayor presión hacia la de menor presión. Cuanto mayor sea la diferencia de presión entre estos dos puntos, mayor será el flujo de aire.

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

El aire que circula a través de un conducto depende no solo de la fricción interna, sino también de factores como el tamaño, la longitud y la forma del conducto, así como de la velocidad.

3.7.1.1 Flujo de aire en paralelo

Vargas (2014), menciona que, en este tipo de circuito, el flujo de aire se divide en un punto, lo que permite diferenciar entre circuitos paralelos cerrados y abiertos. En los circuitos paralelos cerrados, el aire se divide en un punto y se vuelve unir en otro punto.

En abierto en un circuito paralelo abierto, las corrientes que se separan en un punto no se recombinan, pero es posible que dos o más de las ramas se unan en un punto común.

Para su cálculo estimado se aplica las siguientes ecuaciones:

a) Caída de presión

Las caídas de presión de los ramales que la componen son iguales, independientemente del largo, resistencia y cantidad de aire.

Se recomienda que las unidades deben ser lo siguiente para poder facilitar los cálculos.

Resistencia: Pulg.min^2/pie^6; N Seg^2/m^8

Caudal: cfm; m^3/min

Caída de Presión: pulgas de agua; N/m^2

$$H_1 = H_2 = H_3 = \cdots H_n \ (Segunda\ Ley\ de\ Kirchhoff) \qquad \text{Ec. (17)}$$

b) Caudal

El caudal total del sistema de galerías en paralelo es igual a la suma de los caudales individuales.

$$Q_t = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \cdots Q_n \ (Primera\ \ Ley\ de\ Kirchhoff) \quad \text{Ec. (18)}$$

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

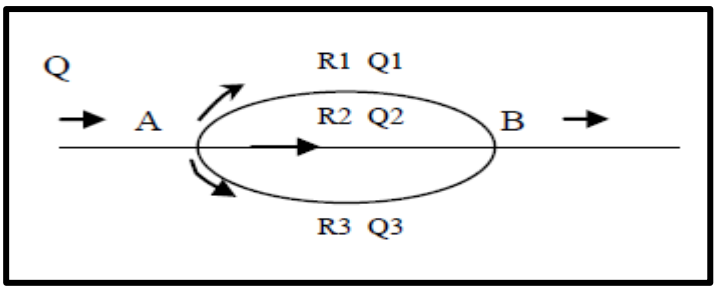


Figura 13 — Circuito en Paralelo

Fuente: Vargas (2014).

c) Resistencia equivalente

Por primera Ley $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \cdots$ Ec. (19)

Por Atkinson $H = R * Q^2$ Ec. (20)

$$Q = \sqrt{\frac{HL1}{R1}} + \sqrt{\frac{HL2}{R2}} + \sqrt{\frac{HL3}{R3}} = \sqrt{\frac{HL}{R1}} + \sqrt{\frac{HL}{R2}} + \sqrt{\frac{HL}{R3}} +$$

$$Q = \sqrt{HL}\left(\frac{1}{\sqrt{R1}} + \frac{1}{\sqrt{R2}} + \frac{1}{\sqrt{R3}}\right) = \sqrt{HL}\left(\frac{1}{\sqrt{Req}}\right)$$

Por lo tanto:

$$\frac{1}{\sqrt{Req}} = \frac{1}{\sqrt{R1}} + \frac{1}{\sqrt{R2}} + \frac{1}{\sqrt{R3}} + \cdots$$

$$Req = \left(\frac{1}{\frac{1}{\sqrt{R1}} + \frac{1}{\sqrt{R2}} + \frac{1}{\sqrt{R3}}}\right)^2$$

3.7.1.2 Flujo de aire en serie

Vargas (2014), menciona que, el flujo de aire en serie sigue el mismo principio que los circuitos en serie, donde el aire circula a través de varios puntos, y su pérdida aumenta conforme a la resistencia que va encontrando a lo largo del ducto.

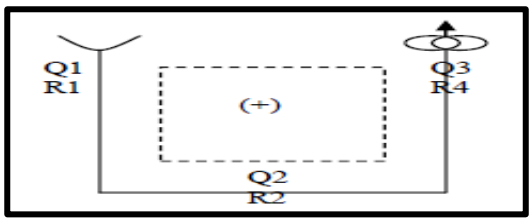


Figura 14 — Circuito en Serie

Fuente: Vargas (2014).

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

Caudales

Si no hay pérdidas desde que el aire entra en la mina hasta que sale de ella, el volumen total de aire permanece constante, es decir:

$$Q = Q_1 = Q_2 = Q_3 = \cdots = Q_n \qquad \text{Ec. (21)}$$

Caída de presión

La caída de presión total es igual a la suma de caídas de presión parciales:

$$HL = HL_1 + HL_2 + HL + \cdots HL_n \ (2da\ Ley, \text{sin}\ presion\ de\ ventilador)$$

Ec. (22)

Resistencias

La resistencia total es igual a la suma de las resistencias parciales que constituyen el circuito:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots R_n \qquad \text{Ec. (23)}$$

3.7.2 Resistencia de flujo de aire

Córdoba (2011), menciona que, la resistencia al movimiento que causa una pérdida de energía o presión en el flujo de aire al desplazarse de un punto a otro en una galería y, está en función de las características de la labor.

Debido a las características de la mina, los conductos (como galerías, chimeneas, etc.) son asimétricos y presentan resistencia al paso del aire, lo que provoca pérdidas de energía y transforma la energía de trabajo en calor, un subproducto de la fricción, similar a cuando el aire turbulento pasa por una superficie. Las turbulencias aumentan a medida que la superficie se vuelve más rugosa, lo que a su vez incrementa la fricción.

3.7.2.1 Pérdida por fricción

John Atkinson, ingeniero de minas, descubrió en 1850 que el diferencial de presión necesario para que el aire fluya por un pozo minero está inversamente relacionado con el área del pozo y es proporcional al cuadrado de la velocidad por la longitud de su perímetro.

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

$$Hf = K * P * L * \frac{Q^2}{5.2 * A^3}$$ Ec. (24)

Dónde:

Hf: perdida de presión (pulg de H_2O)

K: Coeficiente de fricción, mediante la tabla N° 19 (lb. min^2/pie^4 $x10^{-10}$)

P: Perímetro de la labor (pies)

L: Longitud de la labor (pies)

Q: Caudal o flujo de aire (cfm)

A: Área promedio de la labor ($pies^2$)

Existen dos causas principales para la pérdida de energía en la mina subterránea.

- Impacto del aire contra los materiales u objetos existentes interior del ducto.
- Rozamiento provocado por el contacto del aire con las paredes de las excavaciones.

Estas pérdidas debido a la fricción y los choques incrementan la resistencia del sistema de aire, lo que aumenta el consumo de energía.

3.7.3 Reguladores de flujo de aire

Asencios; Domingez (2021), menciona que, los reguladores son los elementos en los sistemas de ventilación que permiten gestionar de manera eficiente el flujo de aire en las diferentes explotaciones mineras. Estos reguladores pueden estar compuestos por partes rígidas y flexibles, y se pueden controlar manualmente o electromecánicamente mediante técnicas automatizadas disponibles gracias a la tecnología del mercado.

Los reguladores más comunes son:

- Ventanas de ventilación
- Cortinas
- Puertas

3.8 Marco conceptual

a) **Aire:** Ondarse (2013), menciona que, el aire es una mezcla homogénea de gases que forma la atmósfera de la Tierra, manteniéndose alrededor del planeta debido a la fuerza de gravedad. Es vital para la vida en la Tierra y es transparente notoriamente.

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

Tabla 7 — Composición de aire seco

Gas	% en volumen	% en peso
Nitrógeno - N2	78,09	75,53
Oxígeno - O2	20,95	23,14
Anhídrido Carbónico - CO2	0,03	0,046
Argón y otros	0,93	1,284

Fuente: Vera Warthon (2019)

b) **Oxigeno:** Seguridad Minera (1998), indica que es un gas de vital importancia es algo más pesado que el aire, insípido, inodoro e incoloro, aunque estamos acostumbrados a respirar aire que contiene un 21% de oxígeno, el cuerpo humano es capaz de funcionar en ambientes que contienen concentraciones mayores o menores de este gas, sin embargo, muchas personas tienen problemas para respirar cuando el nivel de oxígeno desciende al 16% (a 1 atm de presión).

c) **Nitrógeno:** Seguridad Minera (1998), menciona que, es un gas químicamente inerte, incoloro e insípido, con un peso específico de 0.97 kg/m^3. Aunque no es esencial para la combustión ni para la respiración, no es tóxico en sí mismo. Sin embargo, un aumento en su concentración en el aire de las minas puede ser peligroso, ya que disminuye la cantidad de oxígeno.

El incremento del contenido de nitrógeno se debe a:

- Putrefacción de sustancias orgánicas.
- Trabajos con explosivos.
- Desprendimiento de nitrógeno de las rocas y los carbones (el grisú contiene hasta 40% de nitrógeno).

d) Anhidrido Carbónico (CO_2): Seguridad Minera (1998), el aire que respiramos contiene dióxido de carbono, como ya se ha establecido el aire que respiramos lo contiene. Sin embargo, también puede encontrarse en numerosas rocas, carbón y suelos. Los mineros con experiencia pueden identificar la presencia de CO_2 debido a síntomas como dificultad para respirar, calor en las piernas, enrojecimiento de la piel, dolores de cabeza y malestar general. A concentraciones más altas, provocan tos y respiración más rápida.

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

La producción de dióxido de carbono se forma por:

- ❖ Hulleras durante la putrefacción de la madera de mina.
- ❖ Oxidación lenta del carbono.
- ❖ Descomposición de rocas carbonatadas por la acción de las aguas ácidas.
- ❖ Explosiones de grisú y polvo de carbón.
- ❖ Incendios en el interior mina.
- ❖ Uso de explosivos.
- ❖ Respiración humana.
- ❖ Combustión de motores, etc.

El nivel de dióxido de carbono en el lugar de trabajo no debe superar entre el 0.25 y el 3% en minas que tienen buena ventilación. El contenido máximo de CO_2 en los lugares de trabajo es del 0.5% (en volumen) y del 0.75% en las corrientes de aire saliente, según las normas de seguridad. Como el dióxido de carbono es 1.5 veces más pesado que el aire, puede acumularse en la superficie de trabajo y en la parte inferior de los trabajos inclinados.

e) **Polvo en Mina:** Ministerio de Energía y Minas D.S N° 023 – EM (2019), el polvo de mina es un conjunto de partículas minerales pequeñas y extremadamente pequeñas que se han acumulado en las paredes, en suelo y el techo de la mina o que flotan en el aire de la atmósfera de la mina.

Se dotará de aire limpio a las labores de trabajo de acuerdo a las necesidades del personal, equipos y para evacuar los gases, humo y polvos suspendidos que pudieran a la salud del trabajador, el titular de la mina está obligado a suministrar aire limpio para las labores de trabajo. todos los sistemas de ventilación utilizados en las operaciones mineras deben mantenerse dentro de dichos límites.

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

Tabla 8 — Oxigeno consumido por los seres humanos

Grado de actividad	Respiraciones / minuto	Aire inhalado por respiración (litros)	Aire inhalado por minuto (litros)	Oxígeno consumido por minutos (litros)
En reposo	16	0,5	8	0,33
Actividad moderada	30	1,6	48	1,98
Actividad intensa	40	2,5	100	3,96

Fuente: Ministerio de energía y minas (2019)

f) **Temperatura:** Coluccio (2022), la cantidad de energía cinética de las partículas de una masa gaseosa, líquida o sólida se conoce como temperatura, La temperatura aumenta en proporción directa a la velocidad de las partículas, y viceversa.

g) **Operación minera:** Se dice cuando se reconocen las características del yacimiento minero y se decide extraerlo, se inicia el desarrollo y construcción de la mina, para luego pasar a producción o explotación minera que es el proceso de extracción del mineral.

h) **Aire de Mina:** Al pasar por una mina, la composición del aire cambia: la cantidad de oxígeno disminuye, la del anhídrido carbónico aumenta; además, se agregan al aire se gases (CH_4, H_2S, SO_2, CO, H), vapores y polvo. Se considera que el aire de las minas está compuesto por: aire atmosférico, gases activos (gases explosivos o nocivos) y por aire muerto mezcla de anhídrido carbónico y nitrógeno Jiménez (2011).

i) **Densidad de Aire:** La masa de aire en un volumen determinado puede expresarse con el término "densidad del aire". La temperatura y la humedad pueden influir en esta densidad, que a baja altitud es mayor que a gran altitud.

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA

4.1 Tipo y nivel de investigación

4.1.1 Tipo de investigación

Investigación es aplicada: Este estudio se centra en desarrollar una propuesta práctica para mejorar el sistema de ventilación en las operaciones mineras mediante el uso de un software específico (Ventsim). La investigación busca aplicar conocimientos teóricos y técnicos para resolver un problema concreto en un contexto real, en este caso, en la mina Milagros.

4.1.2 Nivel de investigación

Es descriptiva correlacional: Es el grado de profundidad con el que se aborda un fenómeno u objeto de estudio Arias (2012), esta investigación incluye una descripción detallada del estado actual del sistema de ventilación de la mina y el proceso de simulación usando el software Ventsim. Este nivel busca entender y detallar cómo se implementa el sistema propuesto y cómo se realiza la simulación en el contexto de la mina.

Es propositiva: Dado que la investigación propone un nuevo sistema de ventilación y una simulación, se enfoca en desarrollar y sugerir mejoras basadas en análisis y modelado, lo cual es característico de un enfoque propositivo.

4.2 Diseño de la investigación

El diseño de la investigación es cuasi experimental para determinar la efectividad de la ventilación mecánica ya que según La Madriz (2019), es un tipo de estudio empírico que se asemeja a un experimento, pero no cumple completamente con los criterios de un diseño experimental clásico. En un estudio cuasi-experimental, los investigadores manipulan una o más variables independientes para observar su efecto sobre una o más variables dependientes, pero a diferencia de los experimentos verdaderos, no utilizan la asignación aleatoria de los participantes a los grupos experimentales y de control.

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

4.3 Ética de la investigación

En este proyecto de investigación se aplicó fundamentalmente los principios éticos de la investigación como respeto a las citaciones de autores y a los trabajadores de la mina Milagros, y beneficiando con el desarrollo de la investigación, por otra parte, cumpliremos con la responsabilidad social y evitar o minimizar escándalos de daños como resultado de comportamiento anti ético.

4.4 Población y muestra

4.4.1 Población

La población en nuestro proyecto de investigación es la mina milagros de la compañía minera American Real Estate S.A.C. Según Cabezas Mejía (2018), precisan que la población es "el conjunto completo de personas, objetos u otras entidades a las que se refieren los resultados de una investigación".

4.4.2 Muestra

Labores de desarrollo como la galería 965, crucero 115 y cámaras de acumulación de mineral, donde se realiza la medición del flujo de aire de la mina Milagros. Según Cabezas Mejía (2018), la muestra es una parte o fracción de la población seleccionada para realizar un estudio, de tal manera que sus resultados puedan ser generalizados a la población de donde se extrajo.

4.5 Procedimiento

El sistema de ventilación en una mina tiene como propósito llevar y hacer circular una cantidad suficiente de aire para asegurar un ambiente adecuado para los trabajadores y equipos. El aire fresco se distribuye a través de circuitos en serie y paralelo, permitiendo su circulación por todas las áreas de trabajo. Es crucial que estas áreas cuenten con dos puntos de acceso separados para garantizar el funcionamiento efectivo del sistema.

Además, hay trabajos que solo cuentan con un acceso, como una galería sobre veta en construcción o una cortada. En estos casos, es necesario utilizar una manga de ventilación para hacer circular el aire. Este tipo de ventilación se denomina secundaria o auxiliar.

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

4.5.1 Trabajo de gabinete

Recopilación de informaciones de las áreas necesarias de la mina Milagros: Se procede recolectar información sobre la cantidad de personas que laboran en la mina Milagros, informes geológicos, informes topográficos, equipos que trabajan en esta mina, etc.

4.5.2 Trabajo de campo

Medición de área y perímetro de la galería: Se procede a medir la sección transversal, la longitud y el perímetro de la galería 965, crucero 115, cámaras de acumulación y chimenea con estación total y flexómetro, como dato importante la galería tiene una forma rectángulo trapezoidal.

Medición de Gases: Se utilizo un equipo multidetector marca Crowcon; con este equipo se ha medido los gases como la cantidad de oxígeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono, metano entre otros gases presentes en toda la galería.

Medición de velocidad de aire: Esta medida se realiza con un equipo llamado anemómetro, para medir la velocidad del aire, las aspas se colocan de manera perpendicular al flujo, realizando un movimiento lento en zigzag de abajo hacia arriba. De esta forma, se puede determinar la velocidad del aire en el punto de medición.

Medida de la temperatura efectiva y porcentaje de humedad: Esta mediada se realiza con el equipo Termo Hidro Anemómetro, se toman los datos que este equipo arroja como la medida de temperatura y porcentaje de humedad en el punto de medición.

4.5.3 Trabajo de gabinete

4.5.3.1 Cálculo de caudal total requerido

Se calcula el caudal necesario por número de trabajadores de la guardia más numerosa, uso de equipo diesel, consumo de madera, temperatura, caudal requerido por fuga y vale mencionar el caudal requerido por consumo de explosivo no se aplica de acuerdo al reglamento de seguridad y salud ocupacional en minería debido a que se utiliza equipos diesel.

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

4.5.3.2 Tratamiento de datos

Programa Ventsim

Una vez realizados los cálculos del caudal total necesario, se procede a simular la red de ventilación del proyecto utilizando el software Ventsim. Para evaluar el circuito, se empleó la metodología de cálculo de redes de Hardy Cross, un proceso iterativo que ajusta el caudal hasta llegar a una solución valida.

Ingreso de topografía

Es importante tener disponibles los planos en planta de las diferentes galerías o niveles en formatos como CAD. Luego, se deben trazar líneas en el centro de cada labor para representar las longitudes de los ramales. Además, es necesario recopilar información sobre las distancias entre nodos, las coordenadas de estos nodos y las áreas promedio de los ramales. Los niveles en planta deben guardarse por separado, sin combinar toda la información en un solo archivo, y las chimeneas y galerías deben almacenarse en archivos distintos. También es crucial eliminar los ramales innecesarios. Los ramales creados en CAD o MinePlan 15.4 deben guardarse en formatos .dwg o .dxf.

1. Ingresar o importar a Ventsim las especificaciones, dimensiones y geometría de las labores mineras que conforman el circuito de1ventilación, como longitudes, secciones transversales, perímetros, coeficientes de fricción de las superficies, y la geometría en general.
2. Realizar una verificación previa a la simulación, asegurándose de que los datos geométricos y dimensionales se hayan ingresado correctamente, que las entradas y salidas de aire funcionen adecuadamente y que se hayan incluido las pérdidas de carga en1los puntos críticos de cada ramal.
3. Establecer los caudales de entrada medidos en la mina.
4. Llevar a cabo la calibración del sistema ajustando las resistencias teóricas para que el flujo de aire por los ramales coincida con los datos reales obtenidos en la mina.
5. Ingresar las curvas de los ventiladores principales.
6. Verificar que la curva de1funcionamiento ingresada en el sistema coincida con el punto de operación real del ventilador.

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

4.6 Técnica e instrumentos

Métodos

Se realizó observación directa las condiciones de mina en las labores desarrollados en la mina Milagros.

4.6.1 Técnicas

Se llevo a cabo una observación directa para evaluar las condiciones ambientales de la mina y registrar los datos de campo. Para ello, se utilizarán materiales de apoyo como libretas de campo para tomar notas necesarias para el proyecto.

4.6.2 Instrumentos

Los instrumentos utilizados son:

Multidetector ALTAIR 5X

Instrumento utilizado para determinar presencia de gases presentes en las galerías, chimeneas.

Anemómetro

Utilizado para medir1directamente la velocidad del aire circulante en una galería (pies/min; m/s); tal velocidad registrada.

Medidor laser

Llamado por sus siglas en inglés EDM, es un dispositivo electrónico utilizado para medir la distancia, este instrumento nos servirá para poder medir las dimensiones de las galerías, tales dimensiones registradas para luego realizar los cálculos respectivos.

Termo Hidro Anemómetro

Instrumento para poder medir la temperatura y1porcentaje de humedad en frentes de minado, chimeneas etc.

Estación total

Equipo para tomar datos como la longitud de la galería, levantamiento topográfico de superficie.

4.6.3 Softwares

- AutoCAD 2020
- Microsoft Office 2019
- VentSim
- Mine Plan 15.4

4.7 Análisis estadístico

Para el análisis estadístico se utilizaron tablas de Excel y programas especializados en estadística para generar gráficos de barras y correlaciones entre cantidad y velocidad de flujo de aire, según la tabla N° 21 y 22.

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

CAPÍTULO V
RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1 Análisis de resultados

Una vez recopilada la información necesaria, se procede a analizar y evaluar los resultados obtenidos para modelar el sistema de ventilación utilizando el software Ventsim. A continuación, se presenta la evaluación de las variables en función de los objetivos establecidos en este trabajo de investigación. Para ello, se realizó un monitoreo detallado de los gases presentes, considerando también los datos de monitoreos previos. Además, se destaca la importancia de planificar futuras expansiones de las labores, incluyendo el diseño de subniveles en función de la mineralización detectada.

5.1.1 Diagnóstico inicial de red de ventilación

El análisis de la red de ventilación se llevó a cabo mediante la recopilación de datos en campo sobre los principales puntos de ingreso y salida de aire. Este diagnóstico permitió evaluar la cobertura del sistema de ventilación de ingreso de aire. Cabe destacar que la empresa utiliza una ventiladora axial Airtec modelo VAV-20-10-3450-II, con una capacidad nominal de 5,000.00 cfm y una potencia de 15 hp. Sin embargo, se determinará que la capacidad efectiva promedio del flujo de aire generado por el equipo es de 4,208.09 cfm. En el frente de trabajo, la velocidad del flujo de aire alcanza los 9.3 m/min, un valor inferior al establecido por el reglamento de seguridad minera, lo que indica la necesidad de ajustes en el sistema de ventilación.

Tabla 9 — Ingreso de aire a las labores

ESTACIÓN	EJE	NIVEL	LABOR	SECCIÓN (m^2)	VELOCIDAD AIRE (m/min)	CAUDAL (m^3/min)	CAUDAL ($pies^3$/min)
L-1	Principal	4248	Milagros	6.62	18	119.16	4208.09
TOTAL							**4208.09**

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 9 se aprecia que el flujo de aire natural es 119.16 m^3/min, con una velocidad de 18 m/min, de acuerdo al reglamento de seguridad y salud ocupacional

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

en minería cuando se utiliza explosivo ANFO la velocidad de aire no debería ser menor a 25 m/min, en este caso de acuerdo el flujo determinado de aire no cubre las necesidades para el desarrollo del trabajo.

Tabla 10 — Salida de aire viciado

ESTACIÓN	EJE	NIVEL	LABOR	SECCIÓN (m^2)	VELOCIDAD AIRE (m/min)	CAUDAL (m^3/min)	CAUDAL ($pies^3$/min)
L-2	Principal	4240	Milagros	3.6	17	61.2	2161.26
TOTAL							**2161.26**

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 10 se observa que la velocidad de aire viciado es 17m/min, sección de salida de aire es 3.6 m^2 por la galería y el flujo es de 61.2 m^3/min.

5.1.2 Cálculo de flujo de aire natural en diferentes puntos de la galería principal

Para realizar las mediciones en los1puntos de monitoreo, se utilizó un anemómetro digital. Se establecieron varias estaciones en cada punto1de observación, a incluir tanto la galería principal de ingreso como la de salida del flujo de aire. Posteriormente, se calculó el promedio de las muestras recogidas para obtener datos representativos de las condiciones.

Tabla 11 — Cálculo de flujo de aire en distintos puntos de la galería principal

METROS LINEALES	VELOCIDAD DE AIRE (m/min)	AREA PROMEDIO (m^2)	FLUJO DE AIRE (m^3/min)	FLUJO DE AIRE ($pies^3$/min)
0+00	18	6.62	119.16	4208.09
0+10	17.7	6.62	117.174	4137.96
0+40	16.5	6.62	109.23	3857.42
0+60	16.4	6.62	108.568	3834.04
0+80	16.2	6.62	107.244	3787.29

Fuente: Elaboración propia

La tabla 11 muestra que, a medida que se desciende en profundidad, el flujo de aire disminuye de forma considerable. Esto indica que, en el frente de trabajo, existe una

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

deficiencia significativa en la ventilación, lo que impacta negativamente en las condiciones laborales y resulta en una productividad deficiente.

5.1.3 Gases presentes en las labores

Los gases se1generan por el uso de equipo diésel, explosivo, respiración humana y presencia de madera, para este trabajo de investigación se ha realizado la medición de los1gases como: O_2, CO_2, CO Y NO_2, también se1realiza la medida de temperatura y estas mediciones se realizan en la galería de principal, cámara de acumulación de mineral.

Tabla 12 — Monitoreo de gases en la galería

MONITOREO INICIAL DE LOS GASES							
Estación	Nivel (msnm)	Labor	Temperatura (C°)	O_2 (%)	CO (ppm)	CO_2 (%)	NO_2 (ppm)
L-1	4248	Milagros	10	19.9	30	0.07	2.9
L-2	4240	Milagros	9.5	19.3	34.5	0.08	3.2
PROMEDIO			9.75	19.6	32.25	0.075	3.05

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 12 se observa la concentración promedio de oxígeno (O_2) es de 19.6 % próximo de LMP que es 19.5%, de igual manera los otros gases están encima de LMP según el reglamento de seguridad y salud ocupacional en minería.

5.1.4 Requerimiento de caudal de aire total para la operación

La demanda de aire que se requiere en la mina Milagros para los trabajos en interior mina depende únicamente de cinco factores como son:

- De la cantidad de personas que trabajan por guardia.
- Del consumo de madera.
- Temperatura en las labores de trabajo.
- Del número de equipos diésel que trabajan por guardia.
- Caudal1requerido por fugas.

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

5.1.4.1 Caudal requerido por número de trabajadores

Por encima de 4248 m.s.n.m de acuerdo al Ministerio de Energía y Minas D.S N° 034 - EM (2023), es de 6 m³/minuto- hombre, para el siguiente calculo utilizaremos la siguiente ecuación.

$$Q_{Tr} = F\ x\ N\ (m^3/min) \qquad \text{Ec. (25)}$$

Donde:

QTr = Caudal total (m^3/min)

N= Número de trabajadores de la guardia más numerosa.

F =Caudal mínimo por persona de acuerdo a la escala establecida en el artículo 247 del reglamento de seguridad y salud ocupacional en minería.

Tabla 13 — Número de trabajadores por guardia

N°	Descripción	Cantidad
1	Maestro perforista	1
2	Ayudante del perforista	1
3	Supervisor de mina	1
4	Capataz	1
5	Geólogo	1
6	Topógrafo	1
7	Ayudante del topógrafo	1
8	Operador de scoop	1
Total, de trabajadores		**8**

Fuente: Elaboración propia

Remplazamos en la ecuación N° 25.

QTr = 6 m^3/min*8 = 48 m^3/min = **1695.1** cfm

5.1.4.2 Caudal requerido por consumo de madera.

El consumo de madera solo se realiza en tramos donde hay demasiado fracturamiento del terreno mas no por temas de explotación, y el uso es menor a 20% recuerdo a la tabla N°5.

$$Q_{Ma} = T\ x\ u\ (m^3/min) \qquad \text{Ec. (26)}$$

Donde:

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

Q_{Ma} = Caudal requerido por tonelada de producción (m³/min)

u = Factor de producción, de acuerdo a la tabla N° 5, que es igual a 0

T = Producción de toneladas métricas húmedas por guardia 25 Tn.

Remplazamos en la ecuación N° 26

QMa = 25 TMH*0 = **0.0** cfm

5.1.4.3 Caudal requerido por temperatura.

En este caso las temperaturas en las labores de trabajo son menores 23 °C, como se muestra en la tabla 23 y de acuerdo al reglamento de seguridad en minería, para considerar el requerimiento de aire por temperatura, deben ser mayores a 23 °C.

5.1.4.4 Caudal requerido por equipos diésel.

$$Q_{Eq} = 3\ x\ HP\ x\ D_m x\ F_u\ (m^3/min) \qquad \text{Ec. (27)}$$

Donde:

QEq = Volumen de aire necesario para la ventilación (m³/min)

HP = Capacidad efectiva de potencia (HPs)

Dm = Disponibilidad mecánica promedio de los equipos (%)

Fu = Factor de utilización promedio de los equipos (%)

Tabla 14 — Características del equipo diésel

CANTIDAD	EQUIPO	DISPONIBILIDAD MECANICA (%)	Hp	FACTOR UTILIZACIÓN (%)
01	Scoop Tram ST-2G Atlas Copco	80	117	60
01	Compresora Portátil Ingersoll Rand de 185 CFM	85	81	70

Fuente: Elaboración propia

Remplazamos en la ecuación N° 27

Scoop tram ST-2G

QEq = 3*117*0.8*0.6 = 168.5 m³/min = **5,950.5** cfm

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

Compresora Portátil

QEq = 3*81*0.85*0.70 = 144.89 m^3/min = **5,116.74** cfm

Total, de caudal de equipos diésel

5,950.5+5,116.74 = **11,067.24** cfm

5.1.4.5 Caudal requerido por fugas

En este caso el caudal por fugas es simplemente el 15% del caudal total requerido.

Qf = Qto*15 % Ec. (28)

Remplazamos

Qf = 12,762.34cfm*15% = **1,914.35** cfm

5.1.4.6 Caudal requerido para la operación

Sumamos los resultados de las ecuaciones 25,26,27 y 28.

QTr + QMa + Qt+ QEq + Qf

1,695.1cfm +0.0 cfm +0.0 cfm+ 11,067.24cfm +1,914.35 cfm = **14,676.69 cfm**

Tabla 15 — Cantidad de aire requerido para la operación

DESCRIPCION	FLUJO DE AIRE REQUERIDO (CFM)
Por el número de personas	1,695.1
Por el uso de explosivo	0.0
Por consumo de Madera	0.0
Por temperatura	0.0
Por el uso de equipos diésel	11,067.24
Por fuga del caudal	1,914.35
TOTAL, DE CAUDAL PARA LA OPERACIÓN	**14,676.69**

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la tabla N°15 la cantidad de aire requerido para la operación de la mina Milagros es 14,676.69 cfm, para la proyección de la mina se considera agregar 5,000.00 cfm más de caudal de aire, entonces caudal para

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

cálculos respectivos se considera 14,676.69 más 5,000.00 cfm, un total de 19,676.69 ≈ **20,000.00 cfm.**

En el caso de requerimiento de aire por consumo de explosivo1no se considera debido a que en esta mina se utiliza equipos diésel, según anexo N°38. del reglamento de seguridad en minería.

5.1.5 Dimensionamiento de la ventiladora

5.1.5.1 Velocidad de aire en la galería

La velocidad de aire en la galería principal en la mina milagros será:

$$V = Qt/A \qquad \text{Ec. (29)}$$

$V = 20{,}000 \text{ cfm} / 71.26 \text{ pies}^2$

$V = 280.66 \text{ pies/min}$

$V = 85.55 \text{ m/min}$

5.1.5.2 Sección de la manga

La sección de la manga de ventilación debe ser, por norma, 20 veces más pequeña que la de la galería. fórmula aplicada para la determinar el diámetro de la manga a partir del área de la galería.

$$A = \pi D^2 / 4 \qquad \text{Ec. (30)}$$

Dónde:

A = Área de la manga. (pies^2)

D = Diámetro de la manga (pies)

Teniendo en cuenta que la sección debe ser 20 veces menor que la sección de la galería, entonces la sección de la manga es:

$S = 71.26 \text{ pies}^2 / 20 = 3.56 \text{ pies}^2$.

Reemplazando los valores en la Ecuación 30 y despejando D, se tiene:

$D^2 = 3.56*4/3.1416$

D = 2 pies = 24 pulg (diámetro de la manga)

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

5.1.5.3 Velocidad en la manga

La velocidad en la manga será:

V = 20,000cfm / 3.56 pies².

V = 5617.98 pies / min.

V = 1,712.36 m / min.

Tabla 16 — Parámetros calculados

DESCRIPCION	(Cfm)
Caudal requerido por la operación	20,000.00 cfm
Diámetro de la manga	24 pulg
Velocidad del aire en la galería	85.55 m/min
Velocidad de aire en la manga	1,712.36 m/min

Fuente: Elaboración propia

5.1.6 Capacidad de la ventiladora

Para ventilar una mina, se requiere un flujo de aire específico y una presión adecuada para mover el aire. Una vez que se conoce la pérdida de presión y el caudal de aire necesario, se realizan los cálculos basados en factores como la densidad del aire, la temperatura, la presión y la altitud sobre el nivel del mar. Con estos datos, se aplica la fórmula de presión atmosférica correspondiente a la altura de la bocamina.

$$logP_2 = \log P_1 - \frac{H}{122.4(°F+460)} \qquad \text{Ec. (31)}$$

Dónde:

P_2: Presión atmosférica a la altura del punto de entrada (lbs/pul^2), mm. de Hg, pul. de Hg

P_1: Presión atmosférica al nivel del mar (14,7 lbs/pul^2), 760 mm. de Hg., 29,92 pul. de Hg

H: Altura del punto de entrada (pies).

°F: Temperatura en (°F) a la altura del punto de entrada.

Datos:

°T = 9.75 °C = 49.55 °F

H = 4,248 msnm.

H = 13,937 pies

Tenemos:

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

Reemplazando tenemos en la ecuación N°31

Log P_2 = Log (29,92) – 13937 / 122,4 (49.55 + 460)

Log P_2 = 1.2525

P_2 =anti log (1.2525)

P_2 = 17.89 pul. de Hg

5.1.7 Cálculo de la densidad del aire en mina

$$D = 1.325 * \frac{P_b}{460+°T} \quad \text{Ec. (32)}$$

Dónde:

D= Densidad en (lb / pie³)

T°: Temperatura (°F)

Pb: Presión barométrica o atmosférica en (pulg.de Hg).

Remplazamos en la ecuación N° 32

D = 1.325 * 17.89 / 460 + 49.55

D = 0.047 lb / pie³

D = 0.075 lb / pie³ (densidad de aire estándar)

5.1.8 Determinación de las pérdidas de Presión

Presión estática de la galería

De acuerdo a la tabla y las características de la mina consideramos K = 175 x 10^{-10}, que corresponde a un desarrollo moderadamente obstruido en roca Ígnea, de acuerdo a la tabla N° 19 y está dado en (lb. min^2/pie^4 x10^{-10})

Aplicando la fórmula de Atkinson y los datos medidos de la labor Milagros se tiene:

$$Hf = K * P * L * \frac{Q^2}{5.2*A^3} \quad \text{Ec. (33)}$$

Dónde:

Hf: perdida de presión (pulg de H_2O)

K: Coeficiente de fricción, mediante tablas N°19 (lb.min^2/pie^4 x10^{-10})

P: Perímetro de la labor (31.96 pies)

L: Longitud de la labor (1148.3pies)

Q: Caudal o flujo de aire (20,000.00 cfm)

A: Área promedio de la labor (71.26 $pies^2$)

Reemplazados valores en la ecuación (33)

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

$$Hf = 165 \text{ x } 10^{-10} * 31.96 * 1148.3 * \frac{20{,}000^2}{5.2*71.26^3}$$

Hf = **0.128** pulg de H_2O.

Capacidad del ventilador (C).

$$C = Q * (\frac{\delta \, aire \, mina}{\delta \, aire \, estandar})^{0.5}$$ Ec. (34)

Dónde:

C: Capacidad de flujo del ventilador (cfm)

Q: Caudal de flujo de aire requerido (20,000 cfm)

δ: Densidad de aire de mina y estándar (0.047 y 0.075 lb / pie³)

Reemplazado en la ecuación 34 se tiene.

C= 20,000 $(0.047/0.075)^{0.5}$

C= 15832.46 cfm ≈ 16000 cfm

Potencia del ventilador (P)

$$P = \frac{Q*Ht}{75*n*DE*ME}$$ Ec. (35)

Dónde:

P: Potencia del ventilador (HP)

Q: Caudal de flujo de aire requerido (20,000 cfm)

Ht: Caída de presión del sistema (0.064 pulg. de H_2O)

n: Eficiencia del ventilador (70-85) %

DE: Eficiencia de la transmisión (80 - 90) %

ME: Eficiencia del motor (85–95) %

Reemplazado en la Ecuación 36, se tiene:

$$P = \frac{20{,}000 * 0.128}{75 * 0.80 * 0.85 * 0.9}$$

P = 55 HP

El resultado de la potencia del ventilador debe ser de 55 HP, esto garantiza el caudal de aire requerido para la operación.

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

5.1.9 Requerimiento de caudal de aire Vs. caudal de ingreso de aire de forma natural.

Tabla 17 — Cuadro comparativo de caudal de aire requerido Vs caudal natural de aire en mina

DESCRIPCION	Caudal (m^3/min)	Caudal (cfm)
Caudal de aire requerido	540.6	14,676.69
Ingreso de aire	119.16	4,208.09
Deficiencia	331.44	10,468.6

Fuente: Elaboración propio.

Según la tabla 17, la diferencia entre el caudal de aire requerido y el caudal natural que ingresa a la mina es de 10,468.6 cfm. Esto confirma que, en efecto, la mina Milagros necesita una ventilación mecánica.

5.1.10 Simulación del sistema de ventilación con el software Ventsim

Para procesar la información en Ventsim, se han considerado la labor Milagros ya que es interés en esta investigación. Para realizar la simulación y asegurar el suministro de aire fresco mientras se extrae el aire contaminado, se ha instalado un sistema de ventilación en la boca mina, fue necesario especificar en este estudio los parámetros del ventilador, incluyendo su capacidad, potencia y el diámetro de la manga de ventilación, factor de fricción del conducto como se aprecia en la tabla N° 19.

Para instalar un ventilador, se debe tomar en cuenta la curva característica que proporciona el fabricante. Cada ventilador puede describirse a través de esta curva, y para cada ajuste de ángulo de los álabes, se obtendrá una curva diferente. El punto donde la curva del ventilador se cruza con la resistencia del circuito marca el punto de operación del ventilador.

Para nuestro proyecto de ventilación se ha seleccionado un ventilador AIRTEC, modelo VAV-25 1/4 – 18 -3450 –II – A, de1acuerdo a los cálculos previos que se ha realizado en el presente trabajo de investigación.

En la figura 21, se observa los datos obtenidos mediante trazo e intersección los siguientes valores del ventilador Axial.

Procedimiento de utilización

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

1. Cada ventilador tiene una curva característica para cada ángulo de los alabes (en esta investigación la curva del ventilador es 80).

2. Con el valor del caudal medido de 20,000.00 cfm, se traza una perpendicular hasta la intersección con la curva característica de presión total, con el ángulo correspondiente de los alabes (80). De esta intersección, se traza una horizontal, hacia el eje de la izquierda, allí se puede leer la Presión Total de 9.7 pug. de H_2O entregada por el ventilador.

3. Con el valor del caudal medido de 20,000.00 cfm, se traza una perpendicular hasta la intersección con la curva de potencia, con el ángulo correspondiente de los alabes. De esta intersección, se traza una horizontal, hacia el eje de la izquierda, allí se puede leer la potencia consumida por el ventilador de 55.00 Hp.

Presión total: 9.7 pul de H_2O

Potencia del Ventilador = 55.00 Hp.

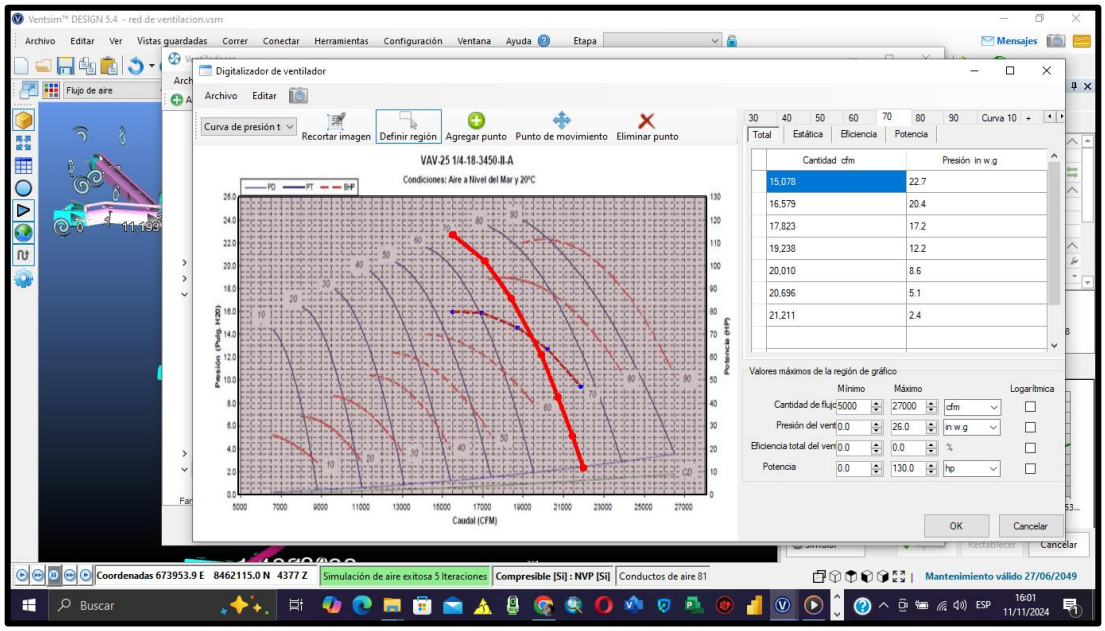


Figura 15 — Digitalización de curva característica del ventilador

Fuente: Propio del autor

5.1.11 Resultado de la simulación con los nuevos cálculos de caudal requerido

La figura 23 muestra la simulación en Ventsim, instalación de un ventilador de impulsión en la bocamina, que suministra un flujo1de aire de 20,000.00 cfm. Este equipo tiene una potencia de 55 hp y genera una presión de 9.7 pulgadas de columna de agua (H_2O), enviando aire fresco hasta el frente de trabajo, como se observa en la figura 23. La ventilación se realiza a lo largo de una distancia de 350 metros mediante una manga de ventilación de 24 pulgadas de diámetro.

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

Los valores utilizados se han calculado de acuerdo con los requerimientos de aire, logrando un caudal de 9,204.00 cfm y una velocidad de 38.1 metros por minuto, como se indica en la figura 17. Estos resultados superan la velocidad mínima de aire exigida por el reglamento de seguridad y salud ocupacional en minería, garantizando así condiciones seguras de ventilación en el área de trabajo.

En cuanto a los contaminantes que existen en el interior de la mina, de acuerdo a la simulación con el requerimiento del caudal optimo se mejoró evacuar en 20 minutos como se muestra en la figura 19.

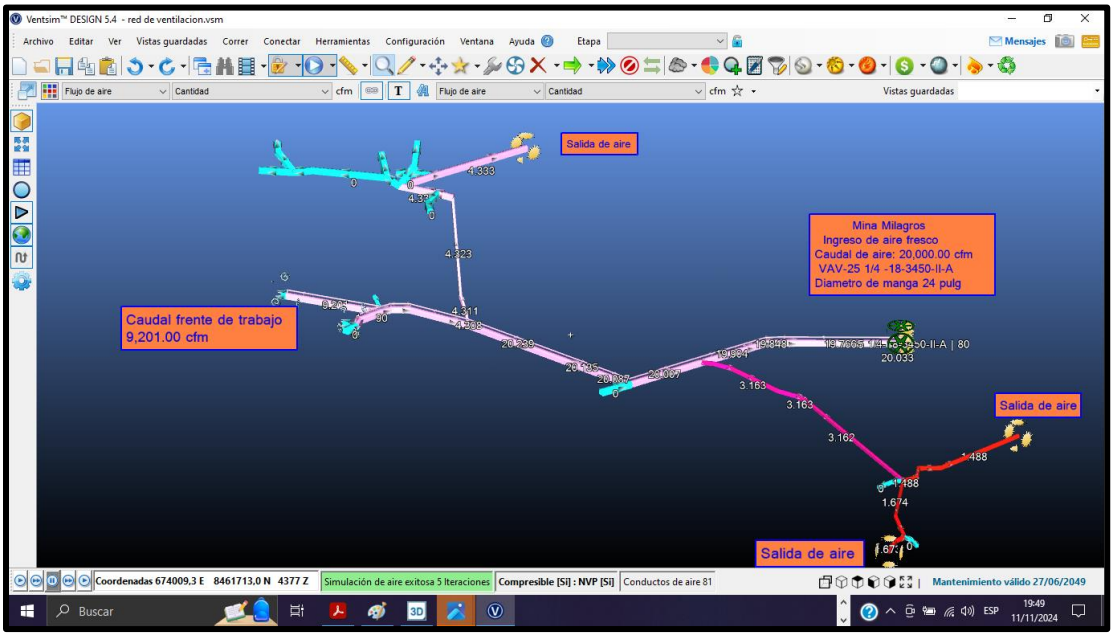


Figura 16 — Visualización de la simulación del proyecto

Fuente: Propio del autor

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

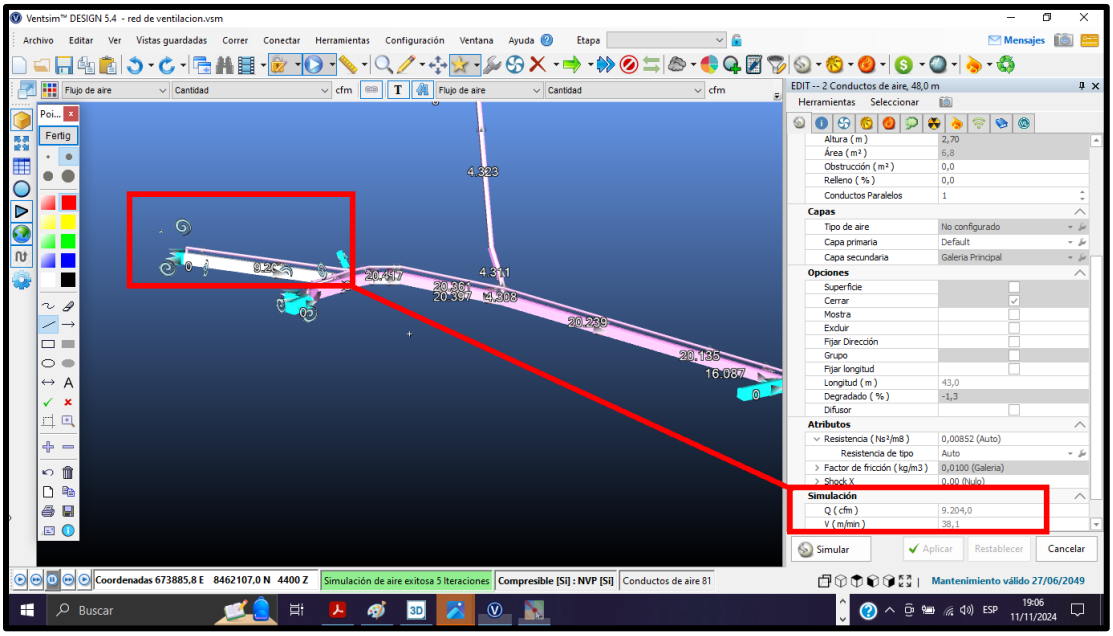


Figura 17 — Velocidad y caudal mejorado.

Fuente: Propio del autor

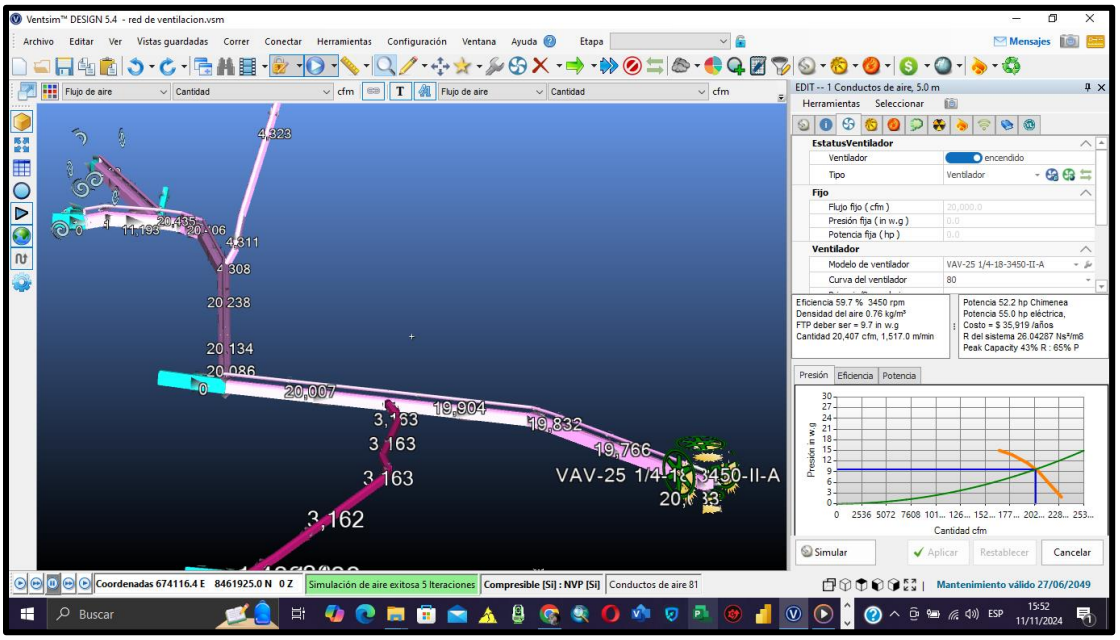


Figura 18 — Curva característica del nuevo ventilador

Fuente*:* Propio del autor

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

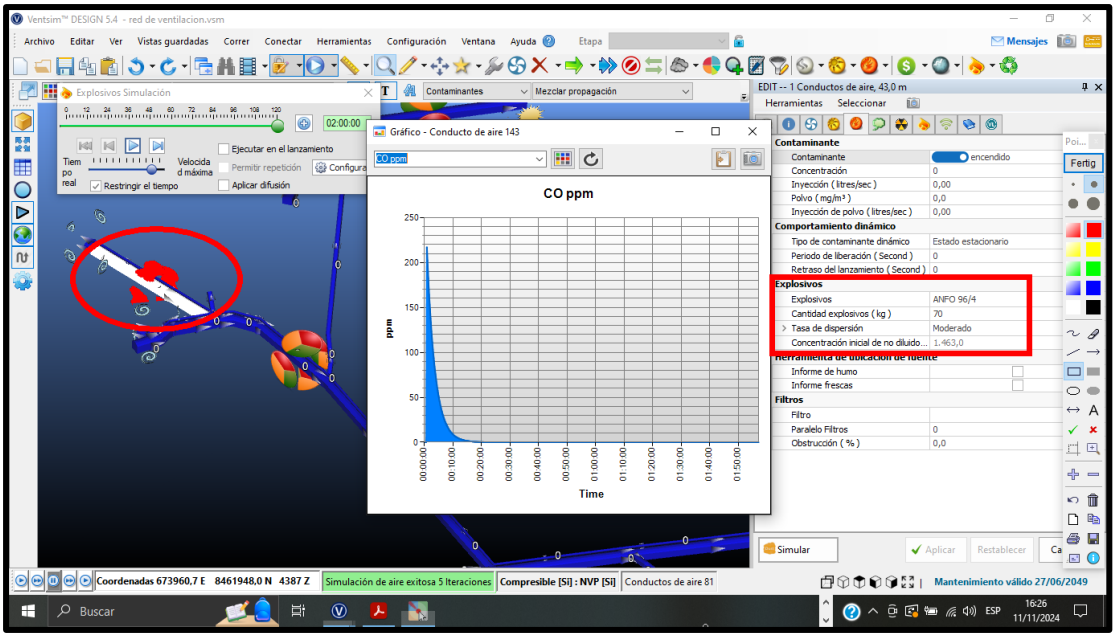


Figura 19 — Simulación de contaminante (CO) con caudal requerido actual

Fuente: Propio del autor

5.2 Contrastación de hipótesis

Al diagnosticar todo el sistema de ventilación en la mina Milagros y simulación con el software Ventsim se ha identificado que el caudal es notablemente insuficiente. Esto resulta en niveles de contaminantes que superan los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos en el reglamento de seguridad y salud ocupacional en minería.

Se ha calculado el caudal de aire necesario para cubrir los requerimientos de ventilación para la operación, en este análisis se ha determinado un flujo de 20,000.00 cfm con una potencia de 55 Hp, que resulta suficiente para garantizar las condiciones adecuadas para los trabajadores, buen funcionamiento de los equipos, dilución de gases contaminantes y caudales proyectadas para el futuro.

Según la simulación con el software Ventsim se mejora la calidad de aire y se redujo el tiempo de evacuación de contaminantes, donde se encuentra el cuerpo mineralizado de una hora a 20 minutos de toda la galería y también logrando subir el caudal y velocidad del flujo en frente de trabajo caudal de 3,019.00 cfm a 9,204.00 cfm) y la velocidad de 12.9 m/min a 38.1 m/min superior a los 25 m/min según el reglamento de seguridad minera.

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

5.3 Discusión

La ventilación es uno de los principales retos en la minería subterránea, y representa un problema común en la mayoría de las minas. Para corregir estas deficiencias en el flujo de aire, es fundamental implementar un sistema de ventilación mecánica, ya que la ventilación natural resulta ser variable e inadecuada para mantener un flujo de aire constante y seguro en todas las áreas de trabajo.

Rivera (2020), en su trabajo de investigación "Análisis del circuito de Ventilación Mediante Simulación con Ventsim de una mina subterránea de carbón" menciona que el software permitió implementar simulaciones y análisis de escenarios, logrando una confiabilidad dentro de los rangos aceptables.

Se ha identificado que el caudal de aire ingresando desde la bocamina, de 5,000.00 cfm, es insuficiente para cubrir las necesidades de ventilación en las zonas de trabajo. Además, el flujo que llega al frente de trabajo es muy reducido. En esta investigación, se determinó una ventiladora con una capacidad de 20,000.00 cfm y una potencia de 55 Hp, necesario para cumplir con los estándares de ventilación en todas las áreas operativas, asegurando condiciones de aire adecuadas para la seguridad y el rendimiento en la mina.

Gamboa y Cotrina (2021), en su investigación titulada "Evaluación de la ventilación empleando el software VentSim para el modelamiento del sistema en una mina subterránea polimetálica en el cerro Jesús, Hualgayoc 2021" el uso del software VentSim permitió modelar un nuevo sistema de ventilación directa que satisface las necesidades de aire requeridas en el interior de la mina, es así que la implementación de VentSim en la evaluación y optimización de la ventilación en la mina de Hualgayoc permitió identificar y mitigar problemas relacionados con la calidad del aire.

Por otro lado, se ha determinado que en el frente de trabajo donde se ubica el cuerpo mineralizado presenta deficiencia de caudal de aire y la velocidad del flujo es menor a 20 m/ min, con los cálculos respectivos se ha logrado aumentar la velocidad del flujo mayores a 38.1 m/ min estos resultados se ha logrado implementando una ventiladora axial AIRTEC, modelo VAV-25 1/4 – 18 -3450 –II – A.

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

CAPÍTULO VI
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

Se pudo confirmar la hipótesis planteada, ya que la implementación de tecnologías en la ventilación, mediante el análisis y simulación con el software Ventsim de distintos escenarios influye significativamente en las operaciones de la mina Milagros.

En el presente trabajo de investigación se ha logrado identificar las zonas que presentan deficiencias en la ventilación según el análisis y simulación con los datos actuales de la mina que es de 5,000.00 cfm, este flujo no cubre las necesidades y requerimiento de aire fresco para la operación, el frente de trabajo el tiempo de evacuación de los gases contaminantes supera una hora aproximadamente. Esto implica que el personal operativo permanece inactivo por un período prolongado, lo cual afecta tanto la productividad como la eficiencia.

El caudal de aire requerido para satisfacer las necesidades de ventilación del personal, los equipos diésel y la dilución de gases tóxicos en las labores es de 20,000.00 cfm, con una presión de 9.7 pulgadas de agua y una potencia del ventilador de 55 hp, suministrada desde la bocamina. Este caudal es suficiente para permitir un incremento en las labores de producción, asegurando que las condiciones de ventilación sean óptimas para la operación.

El caudal de aire y la presión establecida han permitido reducir el tiempo de evacuación de gases contaminantes de toda la galería a 20 minutos, mejorando la calidad y velocidad del flujo de aire. Además, la ubicación del ventilador axial facilita el suministro de aire fresco de manera más eficiente a la zona de trabajo.

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

6.2 Recomendaciones

Colocar ventilador principal de 20,000.00 cfm, en una ubicación estratégica y realizar un mantenimiento constante para garantizar un suministro eficiente de aire fresco y la extracción adecuada del aire contaminado, utilizando mangas de ventilación para optimizar el flujo de aire.

Utilizar Ventsim especializado en ventilación para evaluar y optimizar el sistema de ventilación de la mina.

Contar con un equipo técnico especializado, para fortalecer la gestión de la ventilación como un pilar fundamental en la seguridad minera, de esta manera asegurar las condiciones adecuadas en todo momento y mejorando la productividad general de la operación.

Mantener despejadas y limpias las labores para asegurar una circulación adecuada de aire fresco. Esto permite cumplir con los estándares de seguridad que establece en el reglamento de seguridad en minería.

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acosta , A., & Jorge , G. *Edad de mineralización y fuentes de metales Cu-Mo-Au en el Batolito Andahuaylas-Yauri.,* 2021**.**

Aires Limpio Global. *Aires Limpio Global*, 2007. Recuperado el 21 de Junio de 2023, de Aires Limpio Global: https://airelimpioglobal.com/tipos-de-ventiladores/

Andrade , S. *Guia Metodológica de Seguridad para Ventilacion de Minas.* Santiago de Chile: SERNAGEOMIN, 2008.

Arias. *El Proyecto de Investigación.* EPISTEME, 2012.

Asencios Domingez, J. *Aplicación de reguladores para aumentar los caudales de aire en circuitos de ventilación en la compañía minera Poderosa,* 2021.

Barrera Mancero , P. *Diseño y optimización del circuito de ventilación en el tramo norte-sur de la mina ‘‘Goldmins’’, Zaruma–El Oro, 2020.* Cuenca. Obtenido de https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/9628/1/15261.pdf

Cabezas Mejía, E. D., Naranjo Andrade, D., & Torres Santamaría, J. *Introducción a la metodología de la investigación científica.* Sangolqui, Ecuador: Comisión Editorial de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, 2018.

Carpio , D. *Optimización Del Sistema De Ventilación En Minería Subterránea Usando Ventsim,* 2022.

Obtenido de file:///C:/Users/Karla/Downloads/D095_71248647_T%20(1).pdf

Castillo Aranguren, D. *Evaluación Del Sistema De Ventilación De La Mina El Roble”,Sogamoso-Colombia,* 2017.

Obtenido de https://repositorio.uptc.edu.co/server/api/core/bitstreams/208151ec-dcd5-4be6-b5b6-5ee52571191d/content

Chávez, O. *Influencia de las jornadas laborales atípicas en accidentes de trabajo y enfermedades ocupacionales en la actividad minera,* 2010.

Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Claverias Quicaña, J. *Evaluación y optimizacion del sistema de ventilacion de la Compañía Minera Caraveli S.A.C aplicando el Software Ventsim Visual 3,* 2014. Obtenido de https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/5ecc5d03-958a-4dc6-b3aa-d7d660ae05f1/content

Coluccio, E. *Conceptos*, 2022. Recuperado el 13 de Junio de 2023, de https://concepto.de/temperatura/

Córdoba, C., & Molina , J. *Caracterización de sistemas de ventilación en minería subterránea.* Universidad Nacional de Colombia Sede Medellin, 2011.

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

Craig Stewart. *Manual de Ventsim 5.4.* Ventsim® Software, 2018.

Cuadra Irizar. *Curso de laboreo de minas.* Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, Escuela T.S, 1974.

Gamboa, E., & Cotrina, V. *Evaluación De La Ventilación Empleando El Software Ventsim Para El Modelamiento Del Sistema En Una Mina Subterranea Polimetálica En El Cerro Jesus, Hualgayoc,* 2021. Obtenido de https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/29701/Cotrina%20P%C3%A9rez%2C%20Leiber%20-%20Gamboa%20Cordova%2C%20Elman%20Jhosmel.pdf?sequence=3&isAllowed=n

Huamaní , B., & Misoli, J. *Mejoramiento del Sistema De Ventilación Subterránea de la Mina Condor Iv, Minera el Palacio del Cóndor S.A.C.",* 2020. Universidad Nacional del Centro del Perú: UNCP - Institucional.

Jacinto, R., & Romero, H. *Evaluación del sistema de ventilación aplicando el software VNETPC para el diseño de la corriente de aire,* 2022. Obtenido de https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/12495/2/IV_FIN_110_TE_Jacinto_Romero_2022.pdf

Jiménez, P. *Ventilación de minas subterráneas y túneles: Práctica, aplicada y avanzada en minería clásica y minería por trackless.* Puntual media, 2011.

Karagianni, M., & Benardos, A. *Modelado y optimización del diseño de ventilación para una mina subterránea de bauxita,* 2021. Mater. Proc. Obtenido de https://doi.org/10.3390/materproc2021005029

La Madriz, J. *Metodología De La Investigación. Actuación Humana Orientada Al Conocimiento De La Realidad Observable,* 2019. Cide. Obtenido de https://repositorio.cidecuador.org/bitstream/123456789/75/1/Metodologia%20de%20la%20Investigacion.pdf

Loayza Huari, A. *Optimización del sistema de ventilación a corto plazo en la Unidad Operativa Pallancata-Ayacucho.* Ayacucho, 2021.

Ministerio de Energía y Minas D.S N° 023 - EM. *Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Mineria.* Macro, 2019.

Ondarse, D. *Enciclopedia Concepto*, 2013. Recuperado el Martes de 5 de 2023, de https://concepto.de/aire/

Ponce , V., & Huaraya, E. *Planificación del sistema de ventilación y diseño 3D a largo plazo con el software 3D ventsim, caso Mina Santander – Glencore,* 2022. Obtenido de https://revistas.um.edu.uy/index.php/ingenieria/article/view/1140/1451

Pozo , C., & Ari, J. *Modelamiento y diagnóstico del circuito actual de ventilación en una mina subterránea y propuesta de mejora*, 2023. Obtenido de https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/25925

Rivera, A., & Gersson, A. *Análisis del circuito de ventilación mediante simulación con ventsim de una mina subterránea de carbón artesanal en la Provincia de Arauco,* 2020. Biobío: Universidad de Concepción.
Obtenido de http://repositorio.udec.cl/xmlui/bitstream/handle/11594/4630/Tesis%20Analisis%20del%20circuito%20de%20ventilacion.pdf?sequence=1&isAllowed=y,

Rueda, N., Toro, S., & Zuleta, R. *Optimización del sistema de ventilación en una mina de gran altura, Compañía Minera Raura,* 2012. United States/North Am: Mine Vent Symp.

Savedra Bustamante, Y. J. *Sistema de ventilación, usando el software Ventsim en la compañía minera Chalhuane, Camana, Arequipa.* Arequipa, 2017.

Seguridad Minera. *Instituto de Seguridad Minera-ISEM,* 1998. Recuperado el 15 de Mayo de 2023, de https://www.revistaseguridadminera.com/operaciones-mineras/7-gases-presentes-minas-subterraneas/

Sereshki, F., Saffari, A., & Elabi, E. *Comparison of Mathematical Approximation Methods for Mine,*2016. Obtenido de https://www.arcjournals.org/pdfs/ijms/v2-i1/1.pdf

SERNAGEOMIN. *Guía Metodológica De Seguridad Para Ventilación De Minas.* Santiago de Chile, 2008.

Vargas, R. *Diseño Del Circuito En Un Sistema De Ventilación Natural De La Zona Gisela - Mina Esperanza De Caravelí – Compañía Minera Titán Del Perú S.R.L.* Puno, 2014.

Vera Warthon, E. R. *Implementación y simulación del sistema de ventilación con el software ventsim visual en la Mina San Valentín s.a. – Curahuasi – Apurímac.* Curahuasi, 2019.

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

ANEXOS

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

ANEXO I MATRIZ DE CONSISTENCIA

Tabla 18 — Matriz de consistencia

Título del proyecto	**PROPUESTA DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN Y SIMULACIÓN CON EL SOFTWARE VENTSIM EN LAS OPERACIONES DE LA MINA MILAGROS, EMPRESA MINERA AMERICAN REAL ESTATE S. A. C. ANDAHUAYLAS - 2024**				
Problema	**Objetivos**	**Hipótesis**	**Variables**	**Indicadores**	**Metodología**
Problema general	**Objetivo general**	**Hipótesis general**	**VI:**		
¿En qué medida la propuesta del sistema de ventilación y simulación con el software VentSim influirá en las operaciones de la mina Milagros, empresa minera American Real Estate S.A.C. Andahuaylas – 2024?	Analizar la propuesta del sistema de ventilación y simulación con el software VentSim que influirá en las operaciones de la mina Milagros, empresa minera American Real Estate S.A.C. Andahuaylas – 2024.	Al analizar la propuesta planteada del sistema de ventilación y simulación con el software VentSim influye significativamente en las operaciones de la mina Milagros, empresa minera American Real Estate S.A.C Andahuaylas– 2024.	Simulación con el Software VentSim	Diseño del sistema de ventilación. Volumen de aire propuesto Implementación de tecnología	Tipo de Investigación ***Por el enfoque:*** Cuantitativo ***Según el alcance o nivel:*** Descriptiva correlacional ***Según el diseño:*** Investigación Causi Experimental **Población:** Mina Milagros de la Compañía minera American Real Estate SAC. **Muestra:** Mina Milagros

Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis especificas	VD:	Indicadores	
¿Qué zonas presentan deficiencias en la ventilación según el análisis y simulación con el software VentSim en las operaciones de la mina Milagros, empresa minera American Real Estate S.A.C. Andahuaylas – 2024?	Determinar las zonas que presentan deficiencias en la ventilación según el análisis y simulación con el software VentSim en las operaciones de la mina Milagros, empresa minera American Real Estate S.A.C. Andahuaylas – 2024.	Se pueden identificar las zonas que presentan deficiencias en la ventilación según el análisis y simulación con el software VentSim en las operaciones de la mina Milagros, empresa minera American Real Estate S.A.C. Andahuaylas – 2024.	Propuesta del sistema de ventilación en las operaciones de la Mina Milagros.	Eficiencia de ventilación	TECNICAS E INSTRUMENTOS: Técnicas: Observación directa, revisión bibliográfica. Instrumentos: Softwares (Mine Plane, AutoCad, VentSim, Excel y Word)
¿Qué cantidad de volumen de aire será necesario para mejorar la ventilación en las operaciones en la mina Milagros, empresa minera American Real	Determinar la cantidad de volumen de aire para mejorar la ventilación en las operaciones en la mina Milagros, empresa minera	Al determinar la cantidad de volumen de aire mejora la ventilación en las operaciones en la mina Milagros, empresa minera American Real Estate		Reducción de contaminantes y calidad de aire.	

Estate S.A.C. Andahuaylas – 2024?	American Real Estate S.A.C. Andahuaylas – 2024.	S.A.C. Andahuaylas – 2024.			
¿Qué mejoras en la calidad del aire y reducción de contaminantes se pueden lograr según la simulación con el software VentSim en las operaciones de la mina Milagros, empresa minera American Real Estate S.A.C. Andahuaylas – 2024?	Evaluar las mejoras en la calidad del aire y la reducción de contaminantes que se pueden lograr según la simulación con el software VentSim en las operaciones de la mina Milagros, empresa minera American Real Estate S.A.C. Andahuaylas – 2024.	En la evaluación de la calidad del aire y la reducción de contaminantes, se logra significativamente según la simulación con el software VentSim en las operaciones de la mina Milagros, empresa minera American Real Estate S.A.C. Andahuaylas – 2024.		Zonas de deficiencia	

Tabla 19 — Tabla para determinar el factor de fricción (K)

TIPO DE LABOR	IRREGULARIDADES DE LAS SUPERFICIES DE ALIMENTACION	RECTA			SINUOSIDAD O CURVATURA								
					LEVE			MODERADA			EN ALTO GRADO		
		Limpia	Obstrucción Pequeña	Obstrucción Moderada	Limpia	Obstrucción Pequeña	Obstrucción Moderada	Limpia	Obstrucción Pequeña	Obstrucción Moderada	Limpia	Obstrucción Pequeña	Obstrucción Moderada
Revestida, Superficie suave	Mínimo	10	15	25	20	25	35	25	30	40	35	40	50
	Promedio	15	20	30	25	30	40	30	35	45	40	45	55
	Máximo	20	25	35	30	35	45	45	40	50	45	50	60
Roca Sedimentaria	Mínimo	30	35	45	40	45	55	45	50	60	55	60	70
	Promedio	55	60	70	65	70	80	70	75	85	80	85	95
	Máximo	70	75	85	80	85	95	85	95	100	95	100	110
Enmaderada	Mínimo	80	85	95	90	95	105	95	100	110	105	110	120
	Promedio	95	100	110	105	110	120	110	115	125	120	125	135
	Máximo	105	110	120	115	120	130	120	125	135	130	135	145
Roca,Ignia	Mínimo	90	95	105	100	105	115	105	110	120	120	120	130
	Promedio	145	150	160	155	160	165	160	165	175	170	175	195
	Máximo	195	200	210	205	210	220	210	215	225	220	225	235

Para tuberías de Ventilación	NUEVA	USADA	Factor de Fricción
Acero	15	20	
Yute,Lona,PVC	20	25	K* 10^-10
Lona revestida de jebe	23	28	

Fuente. Howard L. Harman.

Tabla 20 — Tabla de fricción para minas metálicas

TIPO DE CONDUCTO	Factor de fricción, k kg/m^3	Coeficiente de fricción, f(adimensional)
MINAS METALICAS		
Niveles de galería en forma de arco, pernos de roca y malla	0.010	0.017
Rampas en forma de arco, pernos de roca y malla	0.014	0.023
Chimenea rectangular, pernos de roca y malla	0.013	0.022
Chimenea hecha con un raise borer	0.005	0.008
Ruta de faja	0.014	0.023
Galería perforada con TBM	0.0045	0.0075
CONDUCTOS DE VENTILACION		
Ductos de material colapsante (solo para sistemas de inyección)	0.0037	0.0062
Ductos flexibles con espirales de refuerzo totalmente estiradas	0.011	0.018
Fibra de vidrio	0.0024	0.0040
Acero galvanizado enrrollado en espiral	0.0021	0.0035

Fuente: MCPHERSON

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

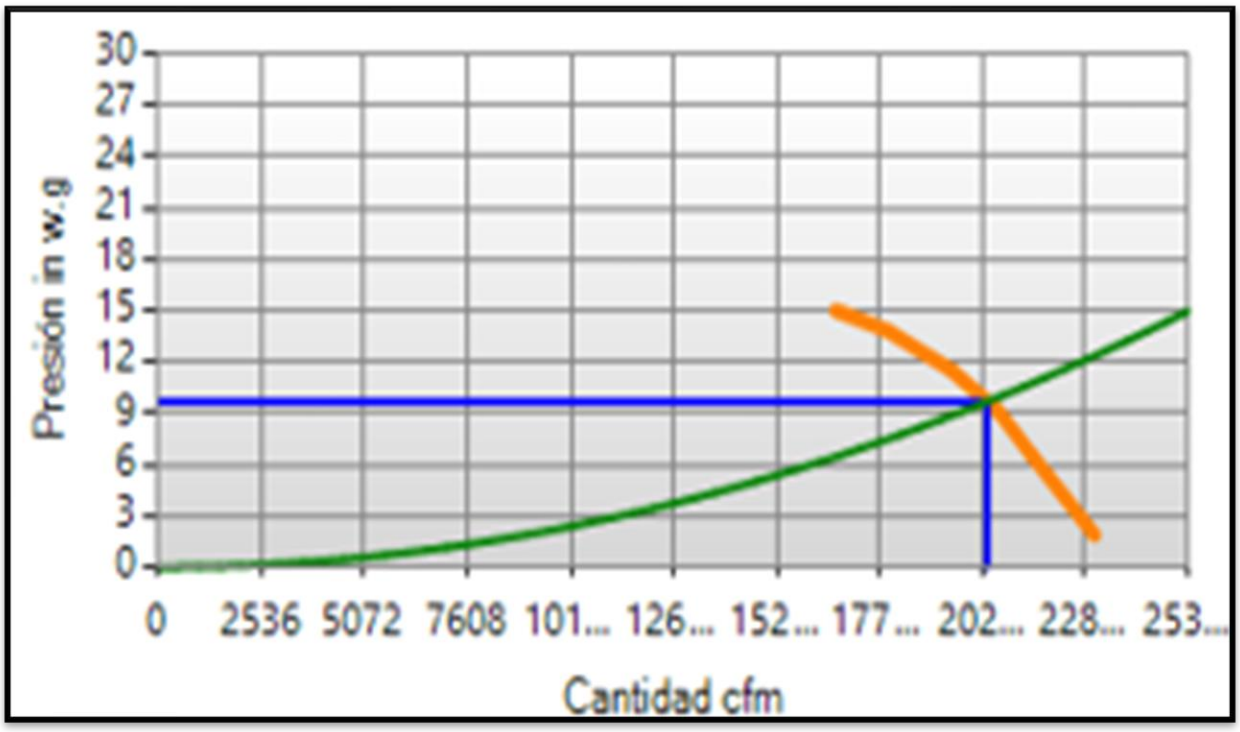


Figura 20 — Curva característica del ventilador (VAV-25 ¼-18-3450-II-A)

Fuente: Propio del autor

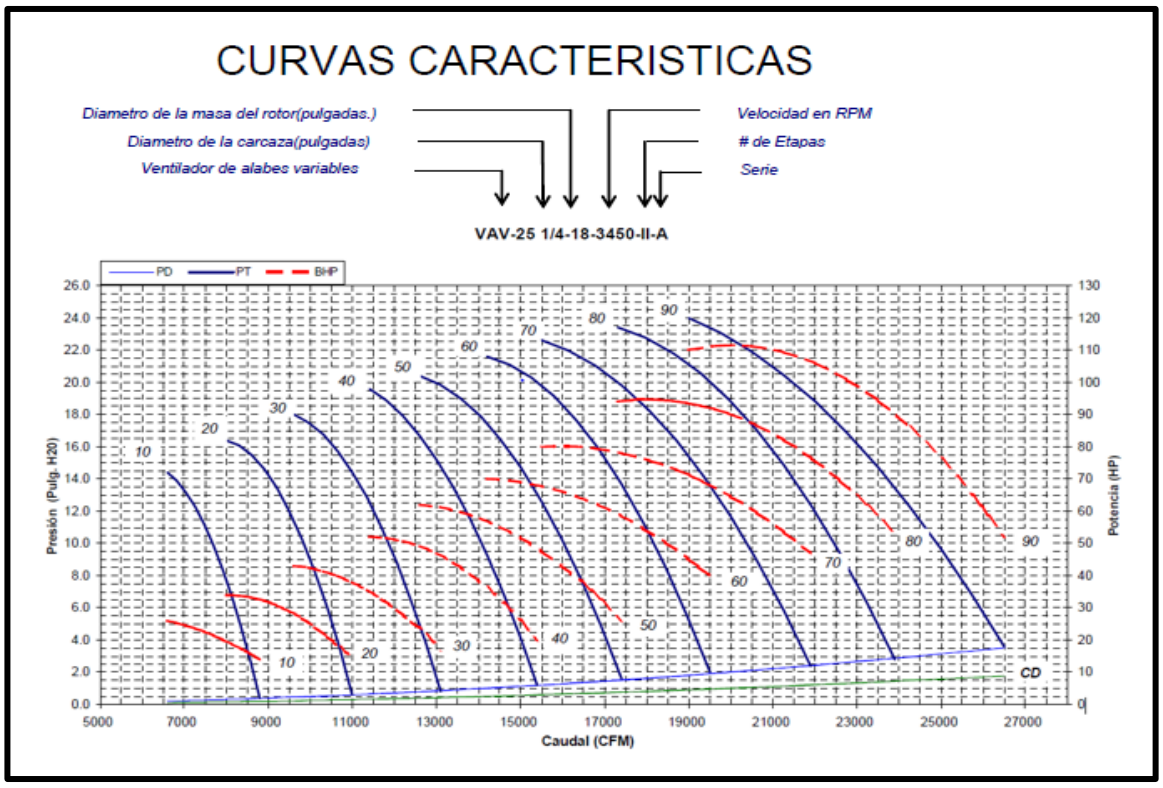


Figura 21 — Características del ventilador

Fuente: (AIRTEC S.A)

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

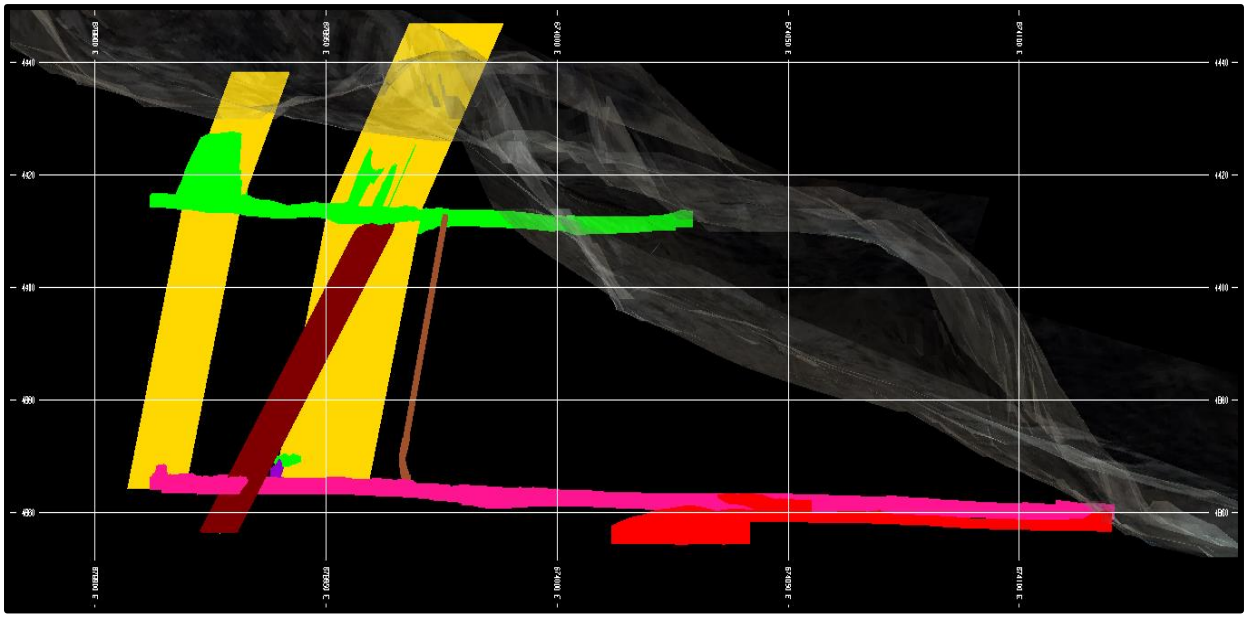


Figura 22 — Vista de perfil en el software MinePlane 3D para la visualización de las labores

Fuente: Propio del autor

Figura 23 — Vista de planta de las labores en el Software VentSim

Fuente: Propio del autor

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

ANEXO II PANEL FOTOGRÁFICO

Figura 24 — Fotografía de Ventiladora axial y Manga de ventilación

Fuente: Propio del autor

Figura 25 — Fotografía de Generador de energía 55k

Fuente: Propio del autor

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

Figura 26 — Fotografía de Scooptram -ST2G -Atlas Copco

Fuente: Propio del autor

Figura 27 — Equipo Multideterctor ALTAIR 5X MSA

Fuente: Propio del autor

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

Figura 28 — Oxigeno mejorado según el reporte

Fuente: Propio del autor

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

Tabla 21 — Velocidad del flujo de aire en frente de trabajo

Fecha	Tiempo	Valor	Unidad
3/10/2024	10:35:21	0.20	m/S
3/10/2024	10:35:22	0.15	m/S
3/10/2024	10:35:23	0.16	m/S
3/10/2024	10:35:24	0.17	m/S
3/10/2024	10:35:25	0.14	m/S
3/10/2024	10:35:26	0.13	m/S
3/10/2024	10:35:27	0.15	m/S
3/10/2024	10:35:28	0.16	m/S
3/10/2024	10:35:29	0.14	m/S
3/10/2024	10:35:30	0.15	m/S
3/10/2024	10:35:31	0.16	m/S
3/10/2024	10:35:32	0.17	m/S
3/10/2024	10:35:33	0.18	m/S
3/10/2024	10:35:34	0.16	m/S
3/10/2024	10:35:35	0.15	m/S
3/10/2024	10:35:36	0.14	m/S
3/10/2024	10:35:37	0.18	m/S
3/10/2024	10:35:38	0.17	m/S
3/10/2024	10:35:39	0.16	m/S
3/10/2024	10:35:40	0.15	m/S
3/10/2024	10:35:41	0.16	m/S
3/10/2024	10:35:42	0.15	m/S
3/10/2024	10:35:43	0.16	m/S
3/10/2024	10:35:44	0.15	m/S
3/10/2024	10:35:45	0.14	m/S
3/10/2024	10:35:46	0.15	m/S
3/10/2024	10:35:47	0.14	m/S
3/10/2024	10:35:48	0.15	m/S
3/10/2024	10:35:49	0.16	m/S
3/10/2024	10:35:50	0.15	m/S
3/10/2024	10:35:51	0.14	m/S
3/10/2024	10:35:52	0.17	m/S
3/10/2024	10:35:53	0.16	m/S
3/10/2024	10:35:54	0.15	m/S
3/10/2024	10:35:55	0.15	m/S
3/10/2024	10:35:56	0.17	m/S
3/10/2024	10:35:57	0.16	m/S
3/10/2024	10:35:58	0.15	m/S
3/10/2024	10:35:59	0.16	m/S
3/10/2024	10:36:00	0.14	m/S
3/10/2024	10:36:01	0.15	m/S

Fuente: propio del autor.

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

Tabla 22 — Flujo de aire en el frente de trabajo

Fecha	Tiempo	Valor	Unidad
3/10/2024	09:15:21	2256	cfm
3/10/2024	09:38:22	2150	cfm
3/10/2024	09:40:23	2200	cfm
3/10/2024	09:42:21	2245	cfm
3/10/2024	09:47:22	2255	cfm
3/10/2024	09:48:23	2248	cfm
3/10/2024	09:50:21	2250	cfm
3/10/2024	09:51:22	2258	cfm
3/10/2024	09:58:23	2256	cfm
3/10/2024	09:03:21	2255	cfm

Fuente: propio del autor.

Tabla 23 — Medida de temperatura galería principal desde la bocamina

Fecha	Valor	Unidad
3/10/2024	8	°C
3/10/2024	7	°C
3/10/2024	9	°C
3/10/2024	8	°C
3/10/2024	9	°C
3/10/2024	7	°C
3/10/2024	8	°C
3/10/2024	8	°C
3/10/2024	9	°C
3/10/2024	10	°C
3/10/2024	8	°C
3/10/2024	10	°C
3/10/2024	11	°C
3/10/2024	10	°C
3/10/2024	11	°C
3/10/2024	9	°C

Fuente: propio del autor.

Repositorio Institucional - UNAMBA Perú

ANEXO III PLANOS

Figura 29 — Plano de ubicación

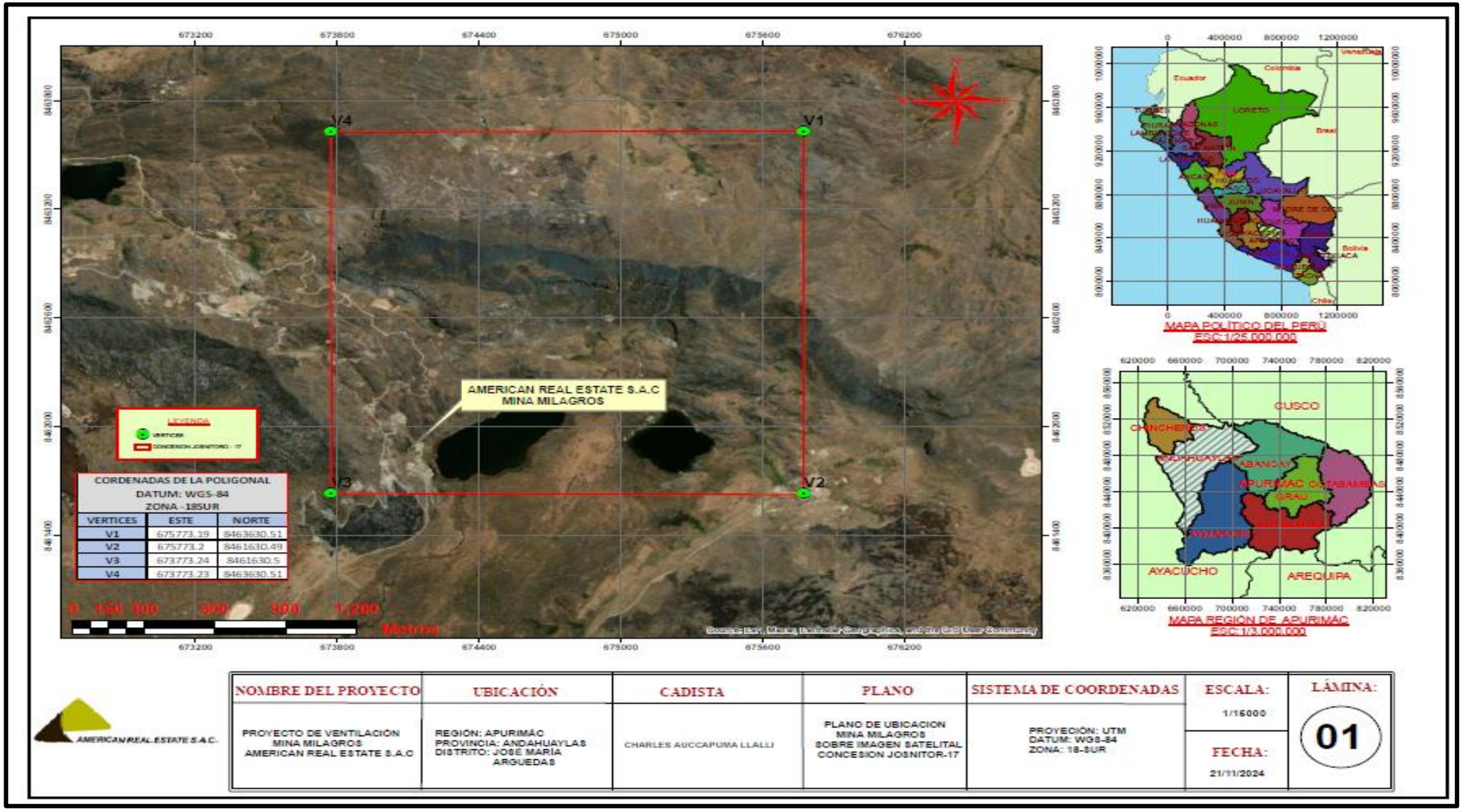


Figura 30— Plano topográfico

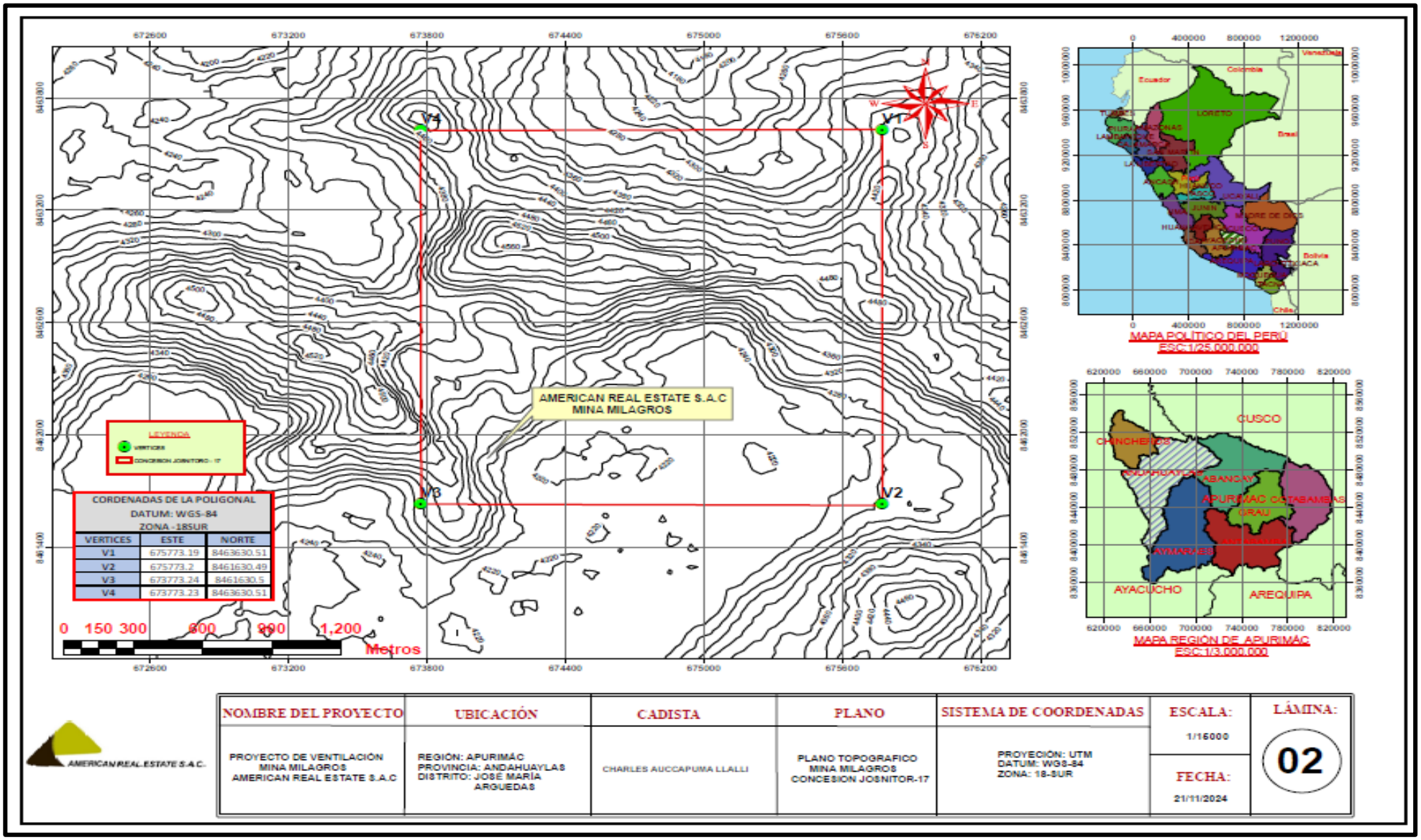


Figura 31 — Plano topográfico de labores

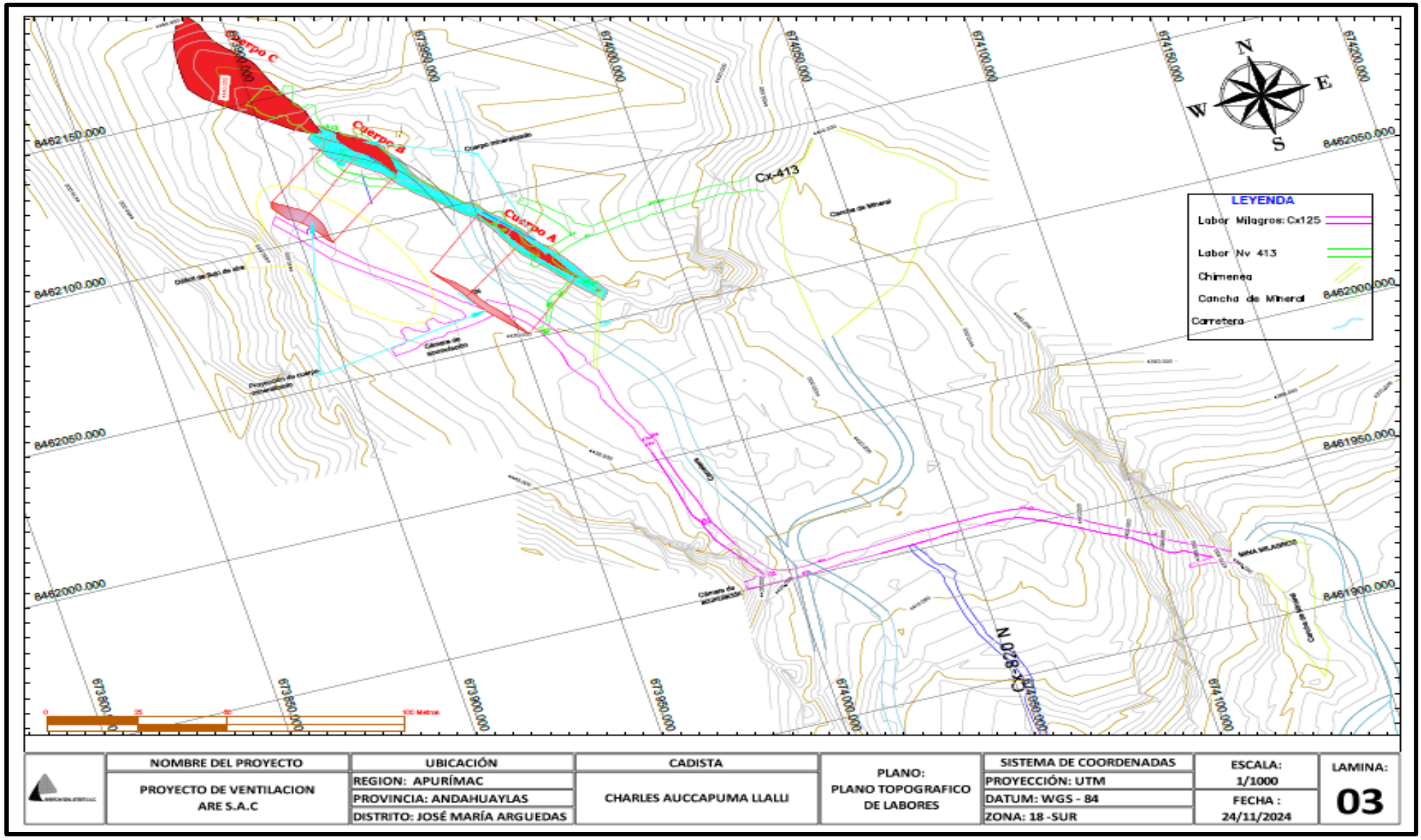
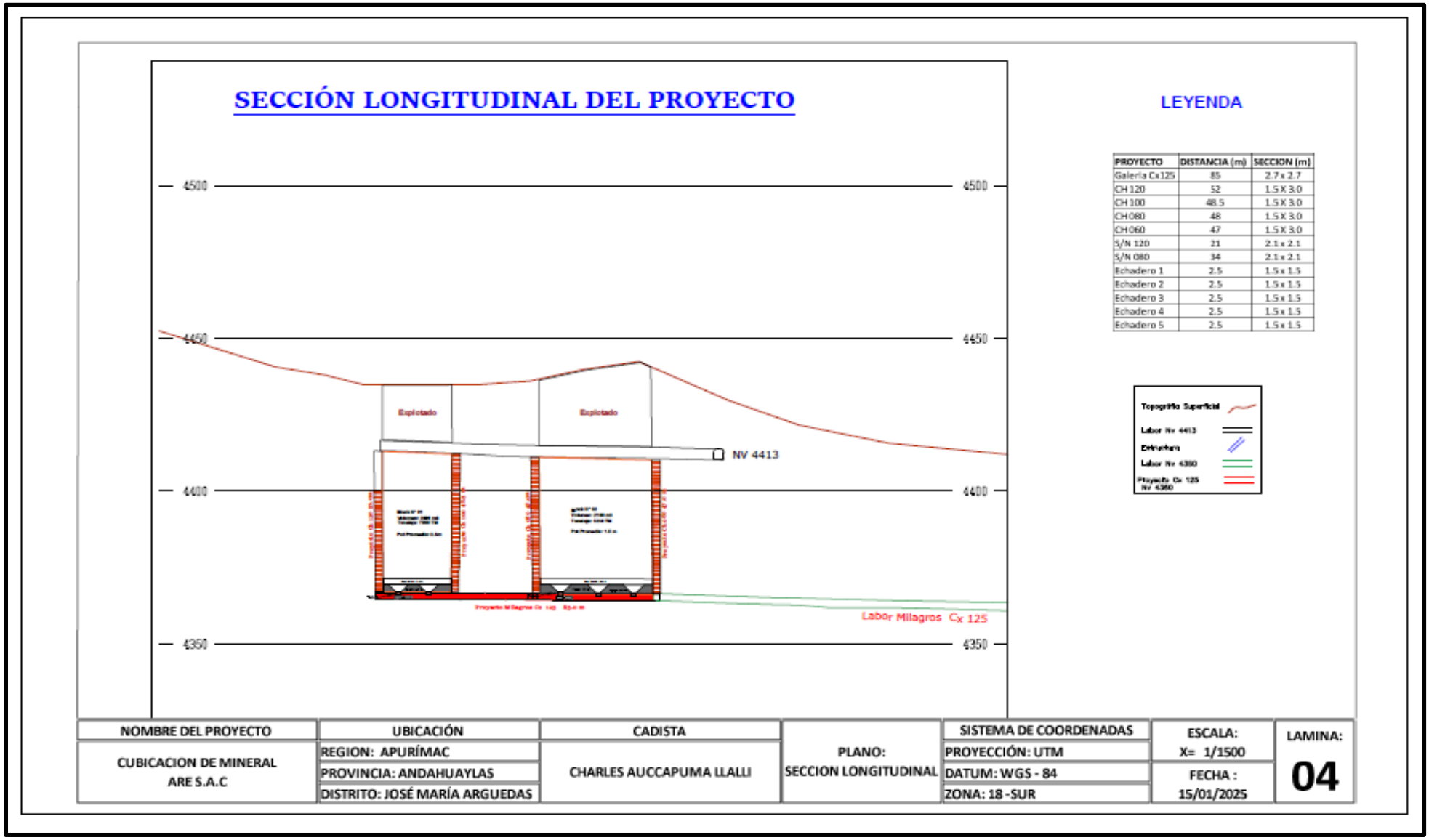


Figura 32— Plano longitudinal del proyecto



PROYECTO	DISTANCIA (m)	SECCION (m)
Galeria Cx125	85	2.7 x 2.7
CH 120	52	1.5 X 3.0
CH 100	48.5	1.5 X 3.0
CH 080	48	1.5 X 3.0
CH 060	47	1.5 X 3.0
S/N 120	21	2.1 x 2.1
S/N 080	34	2.1 x 2.1
Echadero 1	2.5	1.5 x 1.5
Echadero 2	2.5	1.5 x 1.5
Echadero 3	2.5	1.5 x 1.5
Echadero 4	2.5	1.5 x 1.5
Echadero 5	2.5	1.5 x 1.5

Figura 33 —Plano geológico, corredor de skarn