



**UNIVERSIDAD
DEL AZUAY**

DEPARTAMENTO DE POSGRADOS

“Diseño de un sistema de ventilación en las labores subterráneas de la mina Minervilla, cantón Camilo Ponce Enríquez – provincia del Azuay”

Trabajo de Titulación previo a la obtención del título de:
Magíster en Minas con mención en Planeamiento Minero

Autora:

LEONELA MARISOL CÁRDENAS ARGUDO

Director:

LEONARDO ANÍBAL NÚÑEZ RODAS

CUENCA, ECUADOR

2025

Leonela Marisol Cárdenas Argudo

Trabajo de Titulación

Ing. Leonardo Aníbal Núñez Rodas

Octubre, 2025

**“Diseño de un Sistema de Ventilación en las labores subterráneas de la mina
Minervilla, cantón Camilo Ponce Enríquez – provincia del Azuay”**

DEDICATORIA

A mi padre, Walter, que gracias a su protección me ha permitido llegar hasta este momento.

A mi madre, Inés y hermanos, Mauricio y Angélica, quienes han sido ejemplo de lucha y perseverancia, me enseñaron a nunca rendirme y me apoyaron siempre en las decisiones que he tomado, por guiarme y ayudarme a tomar el mejor camino y demostrarme que con esfuerzo y dedicación se cumplen las metas propuestas.

A Ángel, quien ha sido mi apoyo fundamental para el cumplimiento de este posgrado.

Leonela Marisol Cárdenas Argudo

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad del Azuay por haberme acogido durante esta formación académica y personal.

Al Ing. Leonardo Núñez Rodas, director de tesis por el apoyo brindado para la realización de este proyecto.

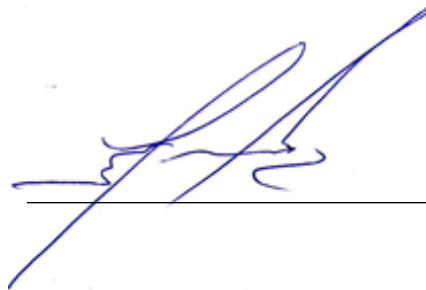
Al Sr. Joffre Chévez Chacón quien me dio apertura en la empresa Minervilla Cía. Ltda., para que realice mi proyecto de tesis.

Leonela Marisol Cárdenas Argudo

RESUMEN

El presente trabajo abordó la mejora de las condiciones de trabajo en la mina subterránea de Minervilla Cía. Ltda. a través del diseño de un sistema de ventilación más eficiente. El proceso inició con la recopilación y el análisis de la información del sistema actual para identificar sus deficiencias, a continuación; se caracterizaron los parámetros de la mina, lo que permitió desarrollar un diseño de ventilación que cumpliera con las necesidades del sistema, una vez calculados los valores de presión y caudal necesarios por nivel, se logró seleccionar con precisión un ventilador principal y cuatro auxiliares, determinando así su ubicación estratégica. El proyecto culminó con la determinación de su costo total y la presentación de las recomendaciones finales para su implementación.

Palabras clave: Ventilación, diseño, eficiencia, análisis, costos



Leonardo Aníbal Núñez Rodas

Director

ABSTRACT

This study addressed the improvement of working conditions in the underground mine of Minervilla Cía. Ltda. through the design of a more efficient ventilation system. The process began with the collection and analysis of information on the current system to identify its deficiencies. Next, the parameters of the mine were characterized, which allowed for the development of a ventilation design that met the needs of the system. Once the necessary pressure and flow values per level were calculated, the principal fan and four fans could be accurately selected and their strategic location determined. The project culminated with the determination of its total cost and the presentation of final recommendations for its implementation.

Keywords: Ventilation, design, efficiency, analysis, costs



Leonardo Aníbal Núñez Rodas

Thesis Director

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
RESUMEN	v
ABSTRACT	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABLAS	xii
ÍNDICE DE ANEXOS	xiii
Introducción	1
CAPÍTULO 1.....	2
1.MARCO TEÓRICO	2
1.1. Mina subterránea.....	2
1.2. Aire minero	2
1.3. Ventilación de minas subterráneas.....	3
1.4. Tipos de ventilación de minas subterráneas.....	4
1.4.1. <i>Ventilación Natural</i>	4
1.4.2. <i>Ventilación Artificial</i>	5
1.5. Equipos de ventilación auxiliar.....	5
1.5.1. <i>Ventiladores</i>	5
1.5.1.1 <i>Ventiladores axiales</i>	6

<i>1.5.1.2 Ventiladores centrífugos</i>	<i>6</i>
<i>1.5.2. Ductos de ventilación</i>	<i>6</i>
1.6. Marco Legal	6
<i>1.6.1. Constitución de la República del Ecuador</i>	<i>6</i>
<i>1.6.2. Ley de Minería.....</i>	<i>7</i>
<i>1.6.3. Reglamento de seguridad y salud en el trabajo en el ámbito minero.....</i>	<i>8</i>
<i>1.6.4. Reglamento de seguridad Minera.....</i>	<i>9</i>
CAPÍTULO 2.....	10
2. CASO DE ESTUDIO	10
2.1. Ubicación	10
2.2. Clima y vegetación	10
<i>2.2.1. Clima.....</i>	<i>10</i>
<i>2.2.2. Vegetación</i>	<i>10</i>
2.3. Aspectos Generales	10
<i>2.3.1. Tipo de mineralización.....</i>	<i>10</i>
<i>2.3.2. Método de explotación.....</i>	<i>11</i>
<i>2.3.3. Proceso de perforación y voladura</i>	<i>13</i>
<i>2.3.4. Carga y transporte.....</i>	<i>15</i>
<i>2.3.5. Diagnóstico del circuito de ventilación actual</i>	<i>15</i>
<i>2.3.6. Valoración del sistema de ventilación actual.....</i>	<i>17</i>
CAPÍTULO 3.....	18
3. OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN	18

3.1.	Definición de propuesta de sistema de ventilación.....	18
3.2.	Determinación del caudal necesario	19
3.2.1.	<i>Caudal de aire por trabajadores</i>	<i>19</i>
3.2.2.	<i>Cantidad de aire necesario según el número de equipos diésel en la mina....</i>	<i>20</i>
3.2.3.	<i>Caudal de aire por consumo de explosivos.....</i>	<i>20</i>
3.2.4.	<i>Caudal requerido por la producción.....</i>	<i>21</i>
3.2.5.	<i>Caudal de aire total requerido</i>	<i>21</i>
3.3.	Cálculos para el diseño del circuito	22
3.3.1.	<i>Diámetro de la manga de ventilación</i>	<i>23</i>
3.3.2.	<i>Determinación de caudal por nivel.....</i>	<i>23</i>
3.3.3.	<i>Pérdidas por fricción.....</i>	<i>23</i>
3.3.4.	<i>Pérdidas locales por accesorios</i>	<i>25</i>
3.4.	Cálculos del sistema.....	26
3.4.1.	<i>Cálculo de línea principal de entrada.....</i>	<i>27</i>
3.4.2.	<i>Cálculo de ramales de entrada.....</i>	<i>28</i>
3.4.3.	<i>Cálculos de retorno</i>	<i>28</i>
3.4.4.	<i>Cálculo de presión total.....</i>	<i>29</i>
3.5.	Elección de ventilador principal	29
3.6.	Ventiladores auxiliares.....	29
3.7.	Cámara de compensación (Pulmón de ventilación).....	29
3.7.1.	<i>Diseño de cámara de compensación.....</i>	<i>30</i>
3.8.	Diagrama de sistema de ventilación propuesto.....	32

3.9.	Presupuesto	33
4.CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		34
4.1.	Conclusiones	34
4.2.	Recomendaciones	35
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		36
ANEXOS		39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Malla de perforación - Galería.....	14
Figura 2 Esquema de Sistema de Ventilación Actual	16
Figura 3 Diagrama Sistema Impelente	16
Figura 4 Esquema sistema de ventilación propuesto	18
Figura 5 Coeficientes de pérdida local - K.....	25
Figura 6 Diseño sistema de ventilación propuesto.....	32
Figura 7 Instalación ramal.....	32

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Características gases - aire minero	3
Tabla 2 Estado de los niveles de la mina.	12
Tabla 3 Dimensiones de las labores de exploración.	12
Tabla 4 Dimensiones de las labores de explotación.....	13
Tabla 5 Mediciones de gases en los diferentes niveles de exploración y explotación.....	17
Tabla 6 Límites máximos y mínimos permisibles del oxígeno y otros gases contaminantes	17
Tabla 7 Número de trabajadores	19
Tabla 8 Cálculo de aire por trabajadores.....	20
Tabla 9 Caudal de aire por consumo de explosivos	21
Tabla 10 Caudal requerido por la producción	21
Tabla 11 Caudal de aire total requerido	22
Tabla 12 Cálculo línea principal de entrada.....	27
Tabla 13 Cálculo de ramales de entrada.....	28
Tabla 14 Cálculo de retorno	28
Tabla 15 Diseño de cámara de compensación	31

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Ubicación empresa Minervilla Cía. Ltda.....	39
---	----

INTRODUCCIÓN

La pequeña minería en Ecuador ha experimentado un notable crecimiento y tecnificación a lo largo de los años; su objetivo principal es adaptar sus operaciones a las nuevas tecnologías, garantizando el cumplimiento de sus metas productivas y las disposiciones legales y normativas vigentes.

Las operaciones mineras se desarrollan a través de diversas fases críticas, entre las principales que se pueden mencionar son: perforación, voladura, carga y transporte, complementadas por etapas auxiliares como ventilación, drenaje y fortificación. Cada una de estas fases es esencial para asegurar el correcto y seguro desarrollo de la actividad extractiva.

Dentro de estas etapas, los sistemas de ventilación juegan un papel crucial, ya que su función es regular las concentraciones de gases y polvo, así como las temperaturas en el interior de la mina, creando un ambiente de trabajo adecuado y seguro, por lo tanto, su diseño e implementación deben basarse en un análisis exhaustivo de los requerimientos y condiciones ambientales específicas de cada caso.

Un ejemplo de esta necesidad se observa en la empresa minera Minervilla Cía. Ltda., ubicada en el cantón Camilo Ponce Enríquez, provincia del Azuay, esta compañía utiliza el método de explotación por corte y relleno en 4 de sus 5 niveles operativos.

A pesar de contar con un sistema de ventilación existente, este no satisface las necesidades de la operación; en respuesta a esta deficiencia, se propone un nuevo sistema de ventilación diseñado con los parámetros técnicos precisos para asegurar un ambiente óptimo para las actividades extractivas.

CAPÍTULO 1

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Mina subterránea

A diferencia de la minería a cielo abierto, que se lleva a cabo en la superficie de la tierra, la minería subterránea es una técnica para extraer minerales que se realiza bajo la superficie. Ingenium (2023) menciona que, es un tipo de extracción mineral que se lleva a cabo bajo tierra, a diferencia de la minería a cielo abierto, que se realiza en la superficie. Para llegar a las reservas minerales que se encuentran bajo la superficie, durante la minería subterránea se excavan pozos, galerías y túneles.

Para acceder al mineral y permitir una extracción más precisa y controlada, es necesario excavar túneles, galerías y pozos. Este método es más costoso y sofisticado que la minería a cielo abierto, pero funciona mejor para los yacimientos situados en lugares donde la minería a cielo abierto tendría un impacto medioambiental insostenible o para los recursos minerales situados en lugares de difícil acceso.

1.2. Aire minero

Todas las galerías mineras subterráneas están llenas de una mezcla de gases, vapores y algo llamado polvo. Si la concentración de gases en el aire de la mina es similar a la del aire atmosférico y no supera los límites establecidos por las normas sanitarias, se considera limpio. Cuando la composición del aire es comparable a la del aire atmosférico, es decir, cuando tiene una cantidad suficiente de oxígeno y sus concentraciones de gases y polvo no superan los límites establecidos por las normas sanitarias, se considera limpio (Zaldumbide, 2014). Para evitar accidentes, enfermedades respiratorias y garantizar un entorno de trabajo seguro en las minas, la calidad del aire subterráneo debe mantenerse dentro de unos límites aceptables.

Principales características de los gases que constituyen el aire minero:

Según el autor Zaldumbide (2014), menciona diferentes gases con algunas de las características:

Tabla 1 Características gases - aire minero

Gases	Característica
O ₂	Es un gas inodoro, insípido e incoloro. De acuerdo con las regulaciones de seguridad y salud en las minas subterráneas, la concentración de oxígeno (O ₂) en las galerías no debe ser inferior al 20%.
N ₂	Se considera un gas incoloro, insípido e inodoro, en el cual aumento en el aire de la mina se produce debido a la descomposición de materia orgánica, y también puede liberarse del material mineralizado y de la roca circundante.
CO ₂	Es un gas sin color, en caso de que el gas minero tenga una cantidad de 0,1 a 0,2 %, este estimula la respiración, pero en caso de tener una concentración mayor puede ocasionar incluso la muerte, se origina por la putrefacción de la madera o puede incluso desprenderse de la roca encajante.
CO	Es un gas tóxico, incoloro, inodoro e insípido, que suele ser responsable de intoxicaciones. Según las normativas de seguridad, su concentración en el aire de la mina no debe exceder el 0,0016%, y en las áreas donde se encuentran los trabajadores, no debe superar el 0,008%.
NO ₂ , N ₂ O ₅	Esta mezcla de gases se genera debido a la detonación de explosivos y es extremadamente tóxica. Una concentración del 0,025% puede provocar una intoxicación mortal. Según las normas de seguridad, su concentración en el aire no debe superar el 0,0001%.
H ₂ S	Es un gas incoloro y altamente tóxico, con un olor característico a huevo podrido y un sabor dulce. Según las normativas de seguridad, su concentración no debe exceder el 0,00066%.
CH ₄	Este gas, que a menudo se libera en los yacimientos de carbón, es incoloro, insípido e inodoro. Según las normativas de seguridad, su concentración en las áreas de trabajo no debe superar el 1%, y en el aire total no debe exceder el 0,75%.
Polvo minero	Una alta concentración de polvo en las minas puede provocar diversas enfermedades, algunas de las cuales son extremadamente peligrosas a lo largo del tiempo. Una de las más comunes y graves es la silicosis.

Fuente: Zaldumbide (2014)

1.3. Ventilación de minas subterráneas

El autor Herbert (2019) comenta que las funciones básicas de la ventilación son:

- Aportar oxígeno necesario para la respiración.
- Mantenimiento de una temperatura adecuada.
- Dilución y extracción del polvo generado.
- Dilución y extracción de aquellos gases que son producto de las operaciones subterráneas (voladuras de arranque, carga, transporte, etc.)
- Dilución de gases inflamables o tóxicos desprendidos o generados en el interior de la mina.

La ventilación de la mina se convierte en la herramienta más versátil para el control y mantenimiento de la atmósfera del interior de la mina, esto dado que, la ventilación permite la circulación de aire fresco, la eliminación de gases peligrosos. La regulación de la temperatura del túnel es fundamental para la salud y la seguridad de los mineros que trabajan bajo tierra. Los gases tóxicos como el monóxido de carbono, el dióxido de carbono y el metano, así como el polvo procedente de las operaciones mineras, pueden acumularse en estos espacios cerrados y provocar graves peligros, como enfermedades respiratorias o explosiones.

1.4. Tipos de ventilación de minas subterráneas

De acuerdo con los principios de flujo de aire, los sistemas de ventilación en minas subterráneas se clasifican en ventilación natural y artificial (Auccasio, Libro de Ventilación de Minas, 2020).

1.4.1. Ventilación natural

La ventilación natural es el proceso por el cual el aire entra de forma natural en el interior de una mina sin necesidad de una fuente externa. Esto depende exclusivamente de variables como la diferencia de presión entre la entrada y la salida, las variaciones

estacionales de temperatura y, en menor medida, la humedad y su composición (Ricse, 2021).

El aire caliente asciende hacia las salidas, mientras que el aire frío entra por las aberturas inferiores debido a la diferencia de temperatura y presión entre el interior y el exterior de la mina. Sin necesidad de maquinaria, el oxígeno se puede reponer continuamente gracias a este flujo constante. En algunos casos, el movimiento del aire dentro de los túneles también se ve influido por los fuertes vientos que soplan en la superficie.

1.4.2. Ventilación artificial

Los ventiladores auxiliares y los conductos se utilizan en la ventilación mecánica o forzada, necesaria en los espacios reducidos de las minas subterráneas. Para ello se utilizan circuitos de evacuación del aire viciado y suministros de aire fresco. Cuando la ventilación natural en las minas subterráneas no es suficiente para mantener un entorno de trabajo seguro y saludable para los empleados, la ventilación artificial es un sistema esencial. Este sistema utiliza herramientas y tecnología para impulsar el aire a través de las galerías, cámaras y túneles de la mina, eliminando el calor, el polvo y los gases nocivos, al tiempo que mantiene un flujo constante de aire fresco (Ricse, 2021).

1.5. Equipos de ventilación auxiliar

1.5.1. Ventiladores

Al producir un cierto aumento de presión que compensa las pérdidas producidas en el circuito, estos dispositivos obligan al aire a fluir a través de él (Herbert, 2019). Los ventiladores son dispositivos mecánicos que mueven el aire de un lugar a otro con el fin de aumentar la circulación, refrescar, ventilar o eliminar los contaminantes de un espacio.

Los ventiladores son fundamentales para mantener un flujo constante de aire fresco en las minas subterráneas, así como para eliminar el polvo y los gases peligrosos que se producen durante las operaciones mineras.

1.5.1.1 Ventiladores axiales

Cuando el aire o gas entra y sale de un ventilador en una dirección paralela al eje de la hélice, se dice que el ventilador es axial. Una hélice con un número variable de palas o álabes unidos a un núcleo o cubo, el componente que transfiere la energía del eje a las palas e impulsa el aire en los ventiladores axiales (S&P, 2017). Los mismos mueven el aire en paralelo al eje de rotación del ventilador, estos son ideales para mover grandes volúmenes de aire a baja presión.

1.5.1.2 Ventiladores centrífugos

Los ventiladores centrífugos, a diferencia de los ventiladores axiales, invierten la dirección del flujo de aire, produciendo un volumen de salida menor y una presión mayor. Funcionan bien cuando hay una distancia significativa entre el ventilador y la zona de ventilación, o cuando se requiere un movimiento de aire a alta presión (Smoot, 2022). Su capacidad para generar presión de manera eficiente es una ventaja, pero también necesitan más espacio y energía, lo que podría aumentar los gastos de funcionamiento. Son fundamentales para sectores como los sistemas de filtración industrial y la minería subterránea, que necesitan un control preciso del flujo de aire.

1.5.2. Ductos de ventilación

En diversas operaciones mineras, los conductos de ventilación se utilizan para eliminar el polvo, los gases y el aire. Además, se emplean para el soplado de aire a presión positiva. Son un sistema ligero y duradero gracias a su estructura, reforzada con anillos metálicos o sintéticos a lo largo de todo el manguito, en donde se crea un sistema de ventilación adecuado utilizando diversos tipos de acoplamientos (Equipartes, 2023).

1.6. Marco legal

1.6.1. Constitución de la República del Ecuador

La minería se ha abordado como una de las actividades de interés estratégico para el país, en donde, su desarrollo se ve estrechamente vinculación de la protección de los derechos humanos, siendo así en el artículo 14 se establece el “derecho de todas las personas a vivir en un ambiente sano”, el cual debe estar ecológicamente equilibrado. Es decir, que este derecho no solo busca proteger el entorno natural, sino también garantizar que las actividades humanas se desarrollen de forma que no pongan en riesgo la salud ni el bienestar de las personas.

Por otro lado, en el artículo 326, se establecen los principios fundamentales que rigen al derecho al trabajo, dentro de los cuales se incluye el derecho de los trabajadores a desarrollar sus actividades en condiciones que aseguren su salud, seguridad y bienestar. Este artículo subraya que el trabajo no solo debe ser una fuente de ingreso, sino también una actividad que se realice en un entorno que respete la dignidad y la integridad de los empleados. En este sentido, la seguridad y la salud ocupacional se convierten en elementos fundamentales para la protección de los trabajadores, lo cual implica que el diseño y la implementación de sistemas de ventilación adecuados en las minas, como en el caso de la mina Minervilla, es esencial para cumplir con estos derechos constitucionales (República del Ecuador, 2008).

1.6.2. Ley de minería

En la Ley de Minería de Ecuador 2018 se establecen normas que rigen las actividades mineras del país, en el cual, se busca un equilibrio para aprovechar los recursos como los minerales con la protección de la seguridad, bienestar y medio ambiente.

El artículo 68, de la Ley de Minería se fija que los titulares de derechos mineros tienen una responsabilidad fundamental en la protección de la salud física y mental de sus trabajadores, así como en la preservación de sus vidas. Es decir, esta obligación implica que deben implementar normas estrictas de seguridad e higiene industrial en la minería que estén

alineadas con las disposiciones legales y reglamentarias pertinentes. En este sentido, los empleadores deben garantizar que sus empleados cuenten con servicios de salud adecuados y una atención permanente, lo que demuestra la importancia de proporcionar condiciones de trabajo saludables y seguras.

Asimismo, en el artículo 117 establece que el Ministerio Sectorial tiene la obligación de dar o dictar caducidad de una caducidad minera si se demuestra que ha incurrido a violación de los derechos humanos (Asamblea Nacional, 2018).

1.6.3. Reglamento de seguridad y salud en el trabajo en el ámbito minero

Este reglamento es una herramienta esencial para regular condiciones laborales seguras y saludables en la industria minera, promoviendo un entorno de trabajo que protege la integridad física y mental de los trabajadores.

El artículo 87, establece que todas las minas subterráneas deben contar con un sistema de ventilación adecuado, ya sea natural o forzado, para asegurar un suministro constante de aire fresco y la salida del aire viciado, protegiendo así la salud de los trabajadores. En cuanto al flujo de aire, el artículo 88 señala que su regulación debe adaptarse a factores como el número de personas, la extensión de las labores y las emisiones de la mina, estableciendo un flujo mínimo de tres metros cúbicos por minuto por persona.

Cuando la ventilación natural no es suficiente, el artículo 89, dispone que se debe permitir la ventilación mecánica con ventiladores, asegurando que la velocidad del aire sea de al menos 15 metros por minuto. Finalmente, el artículo 93 subraya la necesidad de monitorear constantemente los niveles de gases y material particulado en la mina, garantizando una concentración de oxígeno mínima del 19,5% para proteger la salud de los trabajadores (Directorio de la agencia de regulación y control minero, 2014).

1.6.4. Reglamento de seguridad minera

Este reglamento es un conjunto de normas y directrices que regulan las condiciones de trabajo dentro de la industria minera, con el objetivo principal de proteger la salud y seguridad. En el artículo 1, se establece el objetivo de crear normas para proteger la seguridad y salud de los trabajadores en todas las fases de la actividad minera, esto incluye desde la exploración hasta el cierre de las minas, buscando condiciones laborales seguras que garanticen la integridad física y psicológica de los empleados.

En el artículo 2, se amplía el alcance de estas normas, aplicándolas en las fases de prospección, exploración, explotación, beneficio, fundición, refinación y cierre de minas. Esta extensión asegura que las prácticas de seguridad y salud estén presentes y adaptadas en cada etapa del proceso minero.

Por otro lado, en el artículo 3, se detalla que el Ministerio de Energía y Minas debe aplicar los procedimientos de seguridad minera a través de la Dirección Nacional de Minería y las direcciones regionales, asegurando el cumplimiento de la normativa vigente, como el Reglamento de Seguridad y Salud de los Trabajadores y el Mejoramiento del Medio Ambiente del Trabajo.

En el artículo 22 obliga a los titulares de concesiones mineras y sus equipos de trabajo a planificar, evaluar y controlar los riesgos en las labores mineras para evitar accidentes o enfermedades profesionales. Finalmente, el artículo 24 establece que, en minas con más de 100 trabajadores estables, debe crearse una Unidad de Seguridad e Higiene del Trabajo, dirigida por un ingeniero de minas o prevencionista de riesgos mineros, con el fin de gestionar adecuadamente la seguridad laboral (Ministerio de Energía y Minas, 2004).

CAPÍTULO 2

2. CASO DE ESTUDIO

2.1. Ubicación

La empresa minera Minervilla Cía. Ltda., se encuentra ubicada en la parroquia y cantón Camilo Ponce Enríquez, provincia del Azuay. (Anexo 1)

2.2. Clima y vegetación

2.2.1. Clima

Se encuentra determinado por dos tipos: Ecuatorial Mesotérmico Semi-Húmedo y Tropical Megatérmico Semi-Húmedo. La temperatura oscila en las zonas altas de 8°C y en las zonas bajas hasta los 26°C. Las precipitaciones medias anuales fluctúan entre los 500 y 1.500mm (Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuicultura y Pesca, 2015).

2.2.2. Vegetación

En el cantón Camilo Ponce Enríquez, la vegetación alcanza al 50,47% de la superficie total, en su mayoría corresponde a bosque húmedo, seguido de vegetación arbustiva húmeda, vegetación herbácea húmeda y la vegetación herbácea (Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuicultura y Pesca, 2015).

2.3. Aspectos generales

2.3.1. Tipo de mineralización

La mineralización se puede clasificar en función de su importancia:

- Mineralización asociada a sulfuros en intrusiones porfíricas y en la matriz de brechas.
- Mineralización asociada con vetas de cuarzo

- Enriquecimiento de oro en las zonas oxidadas de los saprolitos y contorneando las zonas de brecha.
- La menos importante ocurrencia de oro se asocia con eluvios y depósitos de placer en sedimentos fluviales.
- Los sulfuros constituyen el 2 al 3% de la mineralización y están representados principalmente por pirita, pirrotina y calcopirita que ocurren como disseminaciones y pequeñas vetillas. En menor cantidad se encuentra magnetita e ilmenita.
- El cobre ocurre solamente en asociación con la calcopirita, el arsénico únicamente con la arsenopirita donde se presenta como trazas siendo más abundante en la última etapa, en las vetas de cuarzo.

La mineralización comprende: oro, pirita, calcopirita, pirrotina, arsenopirita, magnetita y poco de molibdenita. Minerales de alteración relacionados al oro: biotita secundaria, turmalina, sericita y sílica. En menor proporción epidota, clorita y carbonatos, mientras que el hierro secundario y óxidos de magnesio son comunes en la zona de oxidación.

2.3.2. Método de explotación

El método de explotación utilizado por la empresa es Corte y Relleno ascendente.

Definición

En este método la excavación se realiza por medio de franjas horizontales o inclinadas en sentido ascendente, las cuales son rellenadas con material estéril antes de proceder al siguiente corte. Por otro lado, entre el piso y el techo de la excavación se deja la altura necesaria para realizar las labores de extracción.

Descripción de las actividades

La empresa Minervilla actualmente mantiene labores simultáneas de exploración y explotación. Principalmente desarrolla sus actividades hacia profundidad, mantiene cuatro niveles inferiores incluido el nivel de acceso, de los cuales tres se encuentran en explotación y uno en exploración, de acuerdo con el cuadro adjunto (Tabla 2).

Tabla 2 Estado de los niveles de la mina.

NIVEL	ESTADO
NIVEL 1	Explotación
NIVEL 2	Explotación
NIVEL 3	Explotación
NIVEL 4	Exploración

Fuente: Elaboración propia

El nivel que se encuentra en exploración, mantiene un solo frente de trabajo, siendo este una Galerías de exploración (Tabla 3).

Tabla 3 Dimensiones de las labores de exploración.

LABOR	UNIDAD	DIMENSIONES
Galería	m	2,00 x 2,50

Fuente: Elaboración propia

Los niveles que se encuentran en explotación, mantienen varios frentes de trabajo de acuerdo a la producción requerida. Las labores se especifican en la Tabla 4.

Tabla 4 Dimensiones de las labores de explotación

LABOR	UNIDAD	DIMENSIONES
Chimeneas de trasiego y camino	m	1,00 x 1,50
Ventanillas	m	1,00 x 2,00
Subniveles	m	1,00 x 2,00
Tajo	m	1,00 x 40,00

Fuente: Elaboración propia

2.3.3. Proceso de perforación y voladura

Dentro del proceso de perforación y voladura se consideran los siguientes aspectos técnicos:

Perforación:

Se realiza a través de perforadoras neumáticas YT27, con barras de perforación de 2, 4 y 5 pies, dependiendo del tipo de labor y de las condiciones que estos presenten, de igual forma se utilizan brocas de 36 mm de diámetro.

Voladura:

Se realiza utilizando el siguiente material explosivo:

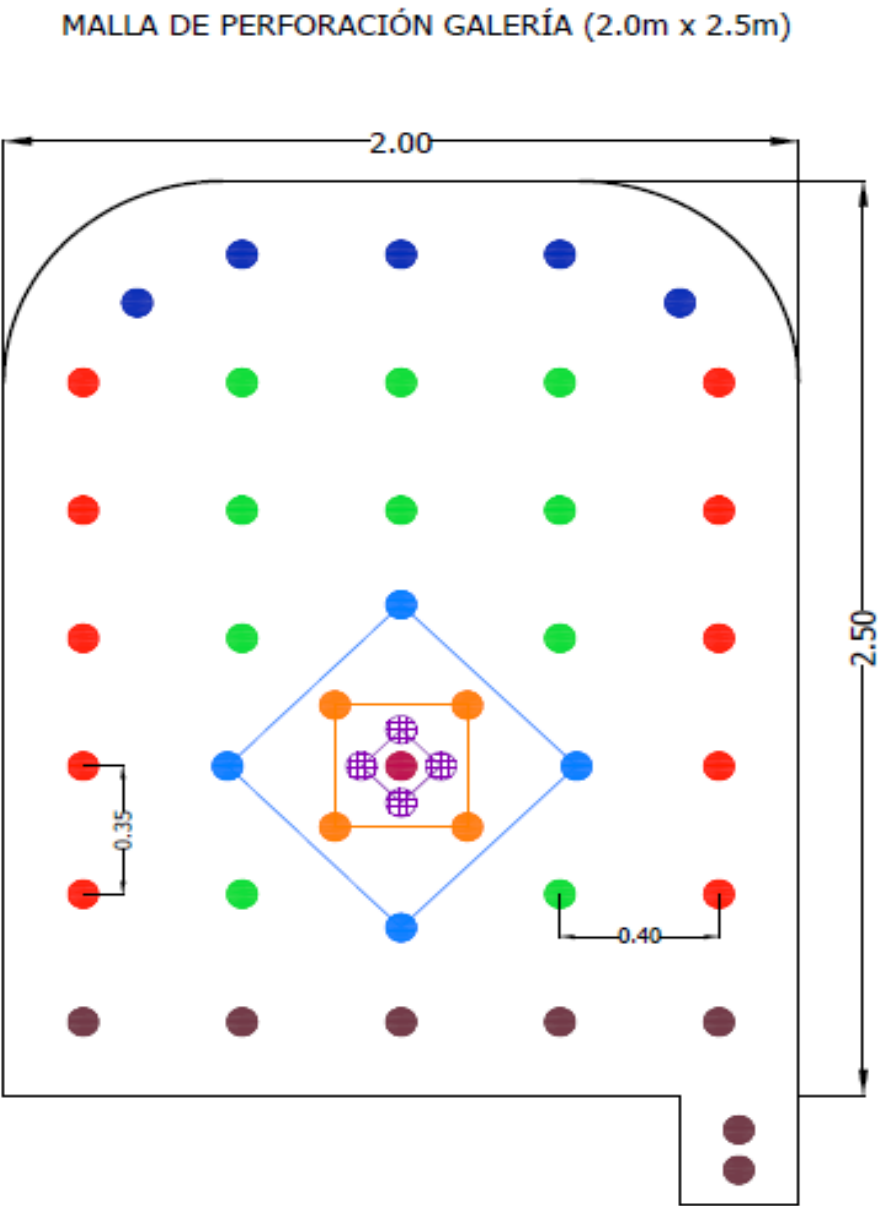
Sistema de iniciación: se utiliza el “Chispeo Manual”, el cual consiste en Mecha de seguridad y Fulminante Ordinario.

Carga de fondo: Dinamita Gelatinosa – RIODIN (7/8 x 8)

Carga de columna: ANFO

Esquema malla de perforación utilizada:

Figura 1 Malla de perforación - Galería



	N° Taladros	Dinamitas Exteriores		Dinamitas Medias	
		Por Taladro	Total	Por Taladro	Total
Iniciador	1	1	1	-	-
Desfogue	4	-	-	-	-
Artesque	4	1	4	-	-
Ayudas	4	1	4	-	-
Desembargue	10	-	-	1	10
Corona	5	-	-	1	5
Cuadrados	10	-	-	1	10
Arneses	7	-	-	1	7
TOTAL	45		9		32

Fuente: Elaboración propia

2.3.4. Carga y transporte

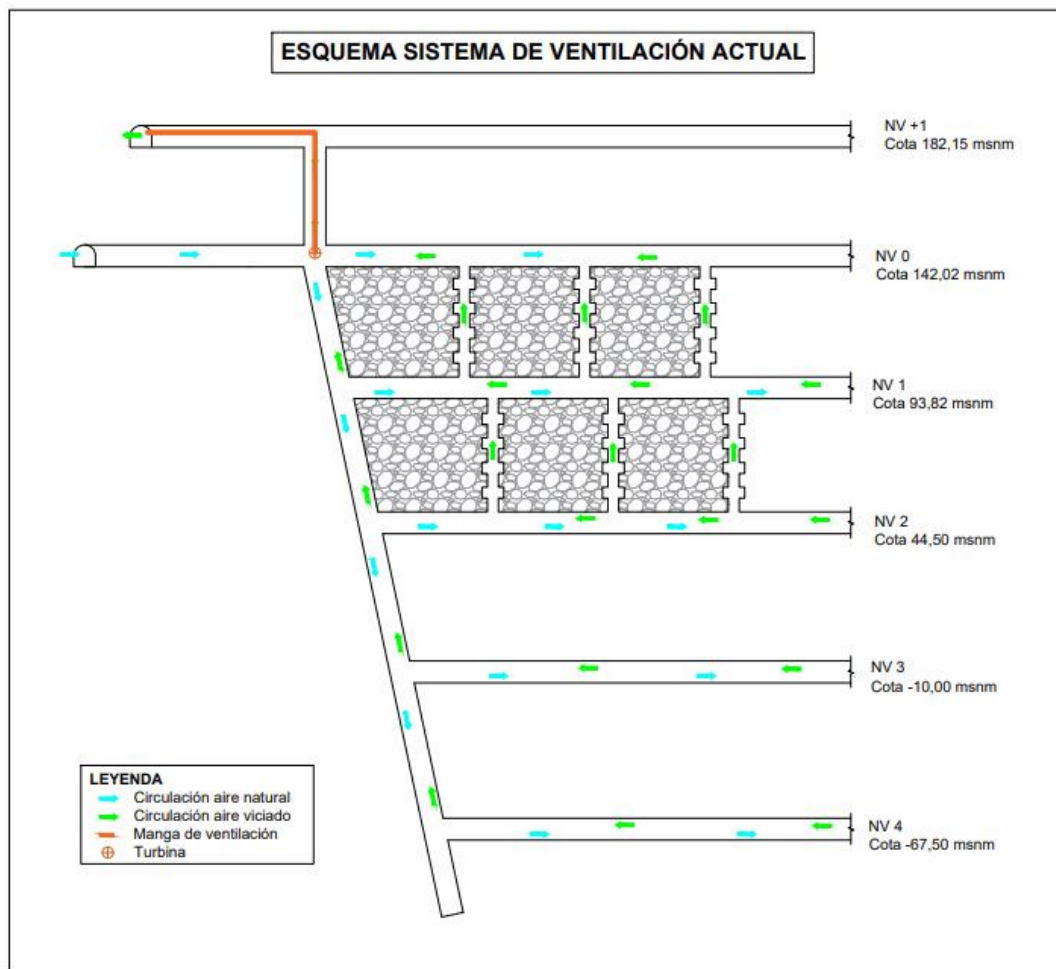
Considerando que tienen un frente de exploración a la altura del nivel principal (acceso) y los frentes de explotación son hacia abajo, el transporte de material ya sea mineral o estéril se lo realiza en diferentes etapas:

- **Tajos:** Se lo realiza de manera manual utilizando palas y carretillas, el material es depositado en las chimeneas de trasiego.
- **Galerías:** se utiliza una cargadora neumática y vagones de 2 toneladas, los cuales son empujados manualmente hasta las tolvas principales ubicadas en cada nivel.
- **Chimeneas de trasiego:** al igual que en las galerías el material es recolectado en vagones de 2 toneladas y empujados manualmente hasta las tolvas principales.
- **Tolvas principales:** el material se transporta hasta el nivel principal utilizando un winche de izaje de 2 toneladas de capacidad.
- **Nivel principal:** a través del uso de una locomotora de 2,5 toneladas, se transporta el material hasta superficie.

2.3.5. Diagnóstico del circuito de ventilación actual

El sistema de ventilación actualmente se basa en la ventilación natural y artificial, ya que cuentan con dos bocaminas a diferente altura, de acceso y ventilación respectivamente. En el nivel principal se encuentra un ventilador axial (el cual no cuenta con ningún análisis técnico), para extraer los gases producto de las voladuras de los niveles inferiores y es dirigido a través de una manga de ventilación hasta la bocamina en el NV +1, de acuerdo como se indica en la Figura 2.

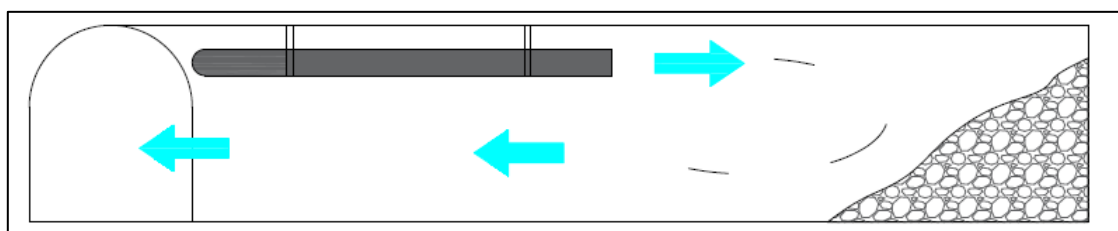
Figura 2 Esquema de Sistema de Ventilación Actual



Fuente: Elaboración propia

En cada uno de los frentes de explotación se utiliza un sistema impelente con tuberías de 1" que suministran aire comprimido y permiten la circulación y posterior evacuación de los gases producto de la voladura hacia los niveles superiores a través de las chimeneas. (Figura 3).

Figura 3 Diagrama Sistema Impelente



Fuente: Elaboración propia

2.3.6. Valoración del sistema de ventilación actual

Para realizar la valoración del sistema de ventilación se realizaron mediciones de gases con el equipo de la empresa, al momento del ingreso de cada turno de trabajo durante una semana, los resultados promedios se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5 Mediciones de gases en los diferentes niveles de exploración y explotación

GAS	NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3	NIVEL 4
Oxígeno	20,30	20,40	20,30	20,25
Metano (CH ₄)	0	0	0	0
Monóxido de Carbono (CO) (ppm)	127	60,00	87	126,50
Dióxido de nitrógeno (NO ₂) (ppm)	0.20	0,60	1,01	0,15

Fuente: Elaboración propia

Una vez contrarrestados los datos con los límites máximos permitidos establecidos en el capítulo 1 (Tabla 6), se determina que existe deficiencias en el sistema.

Tabla 6 Límites máximos y mínimos permisibles del oxígeno y otros gases contaminantes

Oxígeno	Metano (CH₄)	Monóxido de Carbono (CO)	Dióxido de nitrógeno (NO₂)
>19,5%	< 1,0%	< 80,00 ppm	< 1,00 ppm

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 3

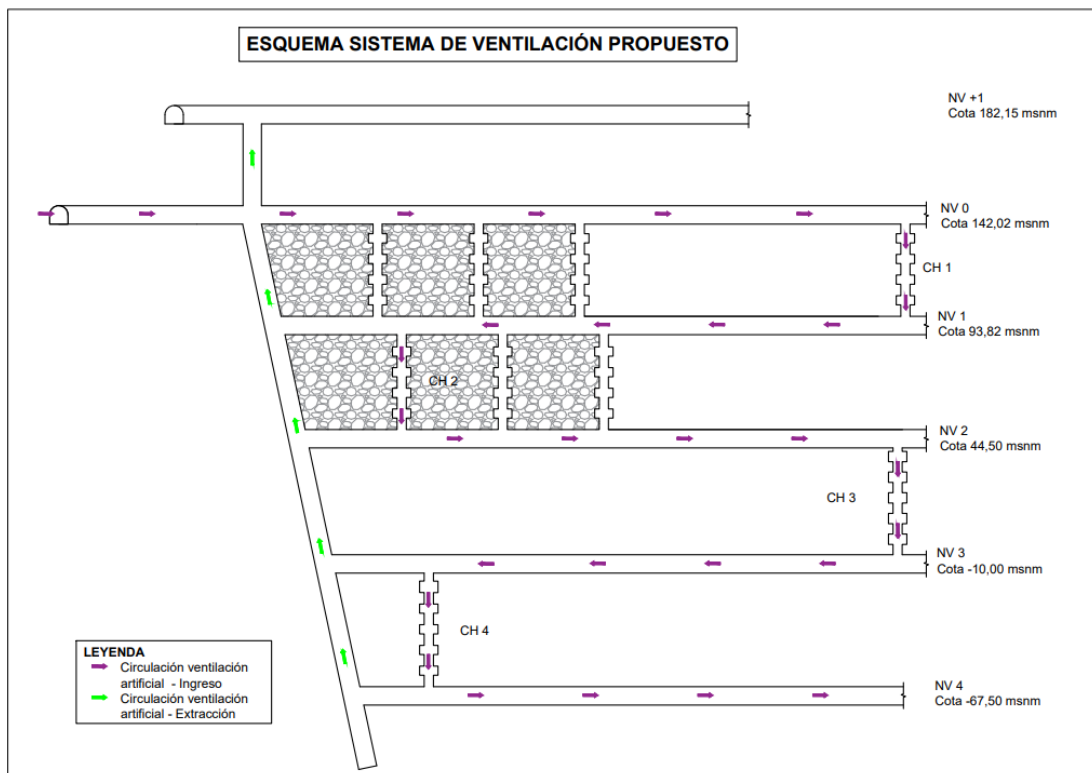
3. OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN

3.1. Definición de propuesta de sistema de ventilación

Debido a la distribución de los frentes de trabajo en los diferentes niveles de explotación y exploración, se requiere el diseño de un sistema de ventilación artificial. Este se implementará mediante mangas que circularán por todos los niveles, liberando el caudal de aire necesario en cada frente (como se ilustra en la Figura 4).

Para el cálculo de diseño, se consideran las condiciones estándar, tomando en cuenta la ubicación de la mina que es 140 m.s.n.m., en el cual se adoptarán las condiciones estándar con una densidad del aire (ρ) de $1,20 \text{ kg/m}^3$ y una temperatura promedio de 20°C .

Figura 4 Esquema sistema de ventilación propuesto



Fuente: Elaboración propia

3.2. Determinación del caudal necesario

De acuerdo a la información recopilada se requiere de ventilación artificial para la extracción de los gases, por lo tanto, se procederá con la ejecución de los cálculos de diseño necesarios para especificar el equipo (ventiladores) y la red de ductos (mangas).

3.2.1. Caudal de aire por trabajadores

El número de trabajadores por turno de acuerdo a la actividad que realizan y al nivel se presenta a continuación:

Tabla 7 Número de trabajadores

CARGO	NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3	NIVEL 4	TOTAL POR CARGO
Líder Cuadrilla		1			1
Perforista	1	2	3	3	9
Ay. Perforación	1	2	3	3	9
Obreros	2	4	6	6	18
TOTAL, POR NIVEL	4	9	12	12	37

Fuente: Elaboración propia

El flujo mínimo de aire por persona es de 3 m³/min. El cálculo se realizará por nivel.

Aplicando la fórmula:

$$Q_1 = N.Trabajadores * 3 \text{ m}^3/\text{min}$$

Se obtiene:

Tabla 8 Cálculo de aire por trabajadores

NIVEL 1	12 m ³ /min
NIVEL 2	27 m ³ /min
NIVEL 3	36 m ³ /min
NIVEL 4	36 m ³ /min
TOTAL	111 m³/min

Fuente: Elaboración propia

3.2.2. Cantidad de aire necesario según el número de equipos diésel en la mina

No aplica, no se utilizan equipos a diésel en la mina.

3.2.3. Caudal de aire por consumo de explosivos

Se considera la fórmula:

$$Q_3 = V * n * A$$

Donde:

V: velocidad de aire 20 m/min (dinamita)

n: número de niveles de trabajo en la mina

A: área promedio de la sección de las labores – niveles de trabajo (m²)

De igual forma el cálculo se realiza por niveles, considerando una sección promedio de 5m²:

Tabla 9 Caudal de aire por consumo de explosivos

NIVEL 1	100 m ³ /min
NIVEL 2	100 m ³ /min
NIVEL 3	100 m ³ /min
NIVEL 4	100 m ³ /min
TOTAL	400 m³/min

Fuente: Elaboración propia

3.2.4. Caudal requerido por la producción

Se considera la fórmula:

$$Q_4 = T * u$$

Donde:

u = norma de aire por tonelada de producción, se considera 0,6 m³/min por existir poco consumo de madera.

T = producción diaria en toneladas por nivel

Tabla 10 Caudal requerido por la producción

NIVEL 1	3,27 m ³ /min
NIVEL 2	6,54 m ³ /min
NIVEL 3	9,81 m ³ /min
NIVEL 4	9,81 m ³ /min
TOTAL	29,43 m³/min

Fuente: Elaboración propia

3.2.5. Caudal de aire total requerido

Tabla 11 Caudal de aire total requerido

DESCRIPCIÓN	CONSUMO m^3/min				
	NV 1	NV 2	NV 3	NV 4	SUB TOTAL
Por trabajadores	12	27	36	36	111,0
De acuerdo el número de equipos diésel	0	0	0	0	0
Por consumo de explosivos	100	100	100	100	400,0
Por producción	3,27	6,54	9,81	9,81	29,43
TOTAL	115,27	133,54	145,81	145,81	540,43

Fuente: Elaboración propia

3.3. Cálculos para el diseño del circuito

De acuerdo a la secuencia de circulación del sistema, se recopilarán los datos de longitud y área de la manga de ventilación por tramos, obteniendo así la presión total a vencer por el ventilador principal a lo largo del circuito, esto al sumar las presiones de entrada y retorno.

La presión de entrada se determinará en función de las pérdidas de presión en la línea principal y en los ramales o derivaciones. Además, para calcular las presiones en cada línea, tanto de entrada como de salida, se sumarán las pérdidas por fricción en cada tramo utilizando la fórmula de Darcy-Weisbach, junto con las pérdidas locales ocasionadas por los accesorios.

Con el caudal y la presión total se determinará el ventilador axial y su potencia, esto puede ser considerado como parte de los catálogos de proveedores disponibles. En caso de no encontrar una opción adecuada, se procederá a la construcción de uno personalizado.

3.3.1. Diámetro de la manga de ventilación

El diámetro de la manga se determinará considerando que la velocidad del aire que circule no supere los 10 m/s, para no ocasionar daños en la misma.

Se emplea la fórmula:

$$V_m = Q/A$$

3.3.2. Determinación de caudal por nivel

Dado que el caudal total se va a ir desalojando parcialmente en cada nivel, se determina el caudal total a circular en la manga de cada nivel:

$$Q_0 = 9,01 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_1 = 7,09 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_2 = 4,86 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_3 = 2,43 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_1 = 2,43 \text{ m}^3/\text{s}$$

3.3.3. Pérdidas por fricción

Las pérdidas de fricción a lo largo de la manga se obtienen con la siguiente fórmula:

$$\Delta p_f = f \frac{L\rho V^2}{2D}$$

En donde:

Δp_f = pérdida de fricción a lo largo de toda la manga

f = factor de fricción

L = longitud

ρ = densidad del aire

V = velocidad del aire

D = diámetro del ducto

El factor de fricción se calcula analizando el número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu}$$

Donde

Re = Número de Reynolds

μ = viscosidad dinámica del aire (Pa·s)

$\mu = 1,8 \times 10^{-5}$ Pa·s

- Si $Re < 2.300$, Laminar
- Si $Re > 2.300$, Transición / turbulento (normalmente turbulento en ventilación)

Una vez determinado el tipo de flujo se determinan las fórmulas para cada caso:

- Laminar: $f = \frac{64}{Re}$
- Turbulento: fórmula de Swamee-Jain:

$$f = \frac{0,25}{\left[\log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2}$$

Donde:

ε = rugosidad absoluta del conducto (m), valor de 0.0006 para mangas flexibles de PVC o lona plastificada. (Hartman, Mutmanský, Ramani, & Wang, 1977)

En el caso de estudio, se utilizará flujo turbulento.

3.3.4. Pérdidas locales por accesorios

Se considera la ecuación:

$$\Delta p_{local} = K \frac{\rho V^2}{2}$$

Donde:

K = coeficiente de pérdida local

Figura 5 Coeficientes de pérdida local - K

Elemento	K típico	Observación
Rejilla/difusor/regulador	1.0 – 3.0	puede variar mucho
Codo 90° largo radio (R≈1.5D)	0.2 – 0.4	valor típico 0.2–0.3
Codo 90° radio corto (R≈D)	0.4 – 1.0	hasta 0.8 para radio corto
Tee (flujo por rama lateral)	1.0 – 2.0	depende del tipo de giro
Contracción brusca	0.2 – 0.5	depende de relación de áreas
Expansión brusca	(1-A1/A2)^2	calculable exactamente
Salida de conducto al ambiente (duct → room)	1.0	
Válvula totalmente abierta (tipo mariposa)	0.15 – 1.0	parcialmente cerrada sube mucho

Fuente: Crane Co. (1982), Idelchik, I. E. (1994), ASHRAE, (1997), The Engineering ToolBox (2024)

Se considerará los siguientes accesorios para la línea principal:

- N0: 1 expansor (ventilador – manga)
- CH1: 2 codos largos de 90°
- N1: 1 contracción de 1.10 – 0.95
- CH2: 2 codos largos de 90°
- N2: 1 contracción de 0,95 – 0,80

- CH3: 2 codos largos de 90°
- N3: 1 contracción de 0,80 – 0,60
- CH4: 2 codos largos de 90°
- N4: 1 salida

Cada ramal tendrá los siguientes accesorios

- 1 Tee
- 1 codo largo de 90°
- 1 rejilla/difusor/regulador

En el tramo de retorno se considera:

- N4 – N3: 1 codo largo de 90°
- N3 – N2: 1 Tee
- N2 – N1: 1 Tee
- N1 – N+1: 1 Tee, 1 salida

3.4. Cálculos del sistema

3.4.1. Cálculo de línea principal de entrada

Tabla 12 Cálculo línea principal de entrada

Tramo	D	Velocidad	CAUDAL	Número de Reynolds	f	Longitud	Δp fricción	Δp local	ΔP Total (Pa)
N0	1,10	9,48	9,01	695034,46	0,02	819,72	715,22	53,90	769,12
CH 1	1,10	9,48	9,01	695034,46	0,02	46,35	40,44	3,23	43,68
Contracción 1	0,95	9,48	7,09			0,00	0,00	10,78	10,78
N1	0,95	10,00	7,09	633224,47	0,02	361,37	419,39	0,00	419,39
CH 2	0,95	10,00	7,09	633224,47	0,02	50,00	58,03	3,60	61,63
Contracción 2	0,80	10,00	4,86			0,00	0,00	12,00	12,00
N2	0,80	9,66	4,86	515343,71	0,02	332,30	445,83	0,00	445,83
CH 3	0,80	9,66	4,86	515343,71	0,02	55,15	73,99	56,02	130,01
Contracción 3	0,60	9,66	2,43			0,00	0,00	11,20	11,20
N3	0,60	8,58	2,43	343350,26	0,02	356,12	541,24	0,00	541,24
CH 4	0,60	8,58	2,43	343350,26	0,02	58,74	89,27	2,65	91,93
N4	0,60	8,59	2,43	343774,68	0,02	201,24	306,58	44,32	350,90

Fuente: Elaboración propia

3.4.2. Cálculo de ramales de entrada

Tabla 13 Cálculo de ramales de entrada

Tramo	D	Velocidad	CAUDAL	Número de Reynolds	f	Longitud	Δp fricción	Δp local	ΔP Total (Pa)
N1	0,60	6,79	1,92	271624,44	0,02	20,00	19,22	120,00	139,22
N2	0,60	7,89	2,23	315480,46	0,02	20,00	25,75	144,43	170,18
N3	0,70	6,31	2,43	294664,01	0,02	20,00	13,77	110,52	124,29

Fuente: Elaboración propia

3.4.3. Cálculos de retorno

Tabla 14 Cálculo de retorno

Tramo	D	Velocidad	CAUDAL	Número de Reynolds	f	Longitud	Δp fricción	Δp local	ΔP Total (Pa)
N4 - N3	0,60	8,59	2,43	343774,68	0,02	58,74	89,49	1,33	90,82
N3 - N2	0,60	4,05	2,43	162000,00	0,02	55,15	19,43	14,76	34,20
N2 - N1	0,60	3,72	2,23	148666,67	0,02	50,00	14,93	12,43	27,36
N1 - N0	0,60	3,20	1,92	128000,00	0,02	91,13	20,40	15,36	35,76

3.4.4. Cálculo de presión total

$$\Delta P \text{ Total (Pa)} = \Delta P \text{ Total Entrada (línea principal + ramales)} + \Delta P \text{ Total Retorno}$$

$$\Delta P \text{ Total (Pa)} = 3.509,54 \text{ Pa}$$

La presión total se le aumentará un 25% más, por posibles pérdidas del sistema, eficiencia de funcionamiento del ventilador, entre otros.

Entonces,

$$\Delta P \text{ Total (Pa)} = 4.386,92 \text{ Pa}$$

3.5. Elección de ventilador principal

Una vez determinado el caudal y la pérdida de presión se debe seleccionar el ventilador de acuerdo a las curvas características que presentan cada uno, en este caso se tomará un ventilador principal para un caudal de $9,01 \text{ m}^3/\text{s}$, presión de 4672,48 Pa, potencia de 45 HP, con un diámetro de 762mm.

3.6. Ventiladores auxiliares

La presión a la que tienen que trabajar los ventiladores en la línea de retorno es relativamente baja, por lo tanto, los cuatro ventiladores auxiliares o secundarios para el caudal individual de cada nivel, no supera 1 HP.

3.7. Cámara de compensación (pulmón de ventilación)

Para garantizar el correcto funcionamiento aerodinámico del sistema de ventilación y mantener la estabilidad de la presión del diseño, se propone la implementación de una cámara de compensación (pulmón de ventilación) a la salida del ventilador principal. El objetivo primario de este componente es mitigar las fluctuaciones de presión (tanto picos como caídas) inherentes al ventilador. Al estabilizar la presión en el punto de inicio de la red de ductos, se

logra una distribución de flujo más uniforme y se reduce la turbulencia, optimizando así la eficiencia del aire a lo largo de la manga de ventilación.

3.7.1. Diseño de cámara de compensación

Para el diseño se tomarán en cuenta el volumen con el que debe contar el mismo y la velocidad a la que debe circular el aire en su interior.

Volumen

$$\text{Volumen (V}_p\text{)} = \text{Caudal Total (Q)} \times \text{Tiempo de Residencia (\tau)}$$

Donde:

τ = rango para sistemas de ventilación 0,5 - 0,7 segundos

Entonces:

$$\text{Volumen (V}_p\text{)} = 9.01 \text{ m}^3/\text{s} \times 0,6$$

$$\text{Volumen (V}_p\text{)} = 5,41 \text{ m}^3$$

Velocidad media

$$V_{media} = \frac{Q}{A}$$

Se considera al pulmón de ventilación como un cilindro, entonces:

$$A = 20,91 \text{ m}^2$$

$$V_{media} = 0,43 \text{ m/s}$$

Esta velocidad logra un flujo lo más laminar y uniforme posible.

Tabla 15 Diseño de cámara de compensación

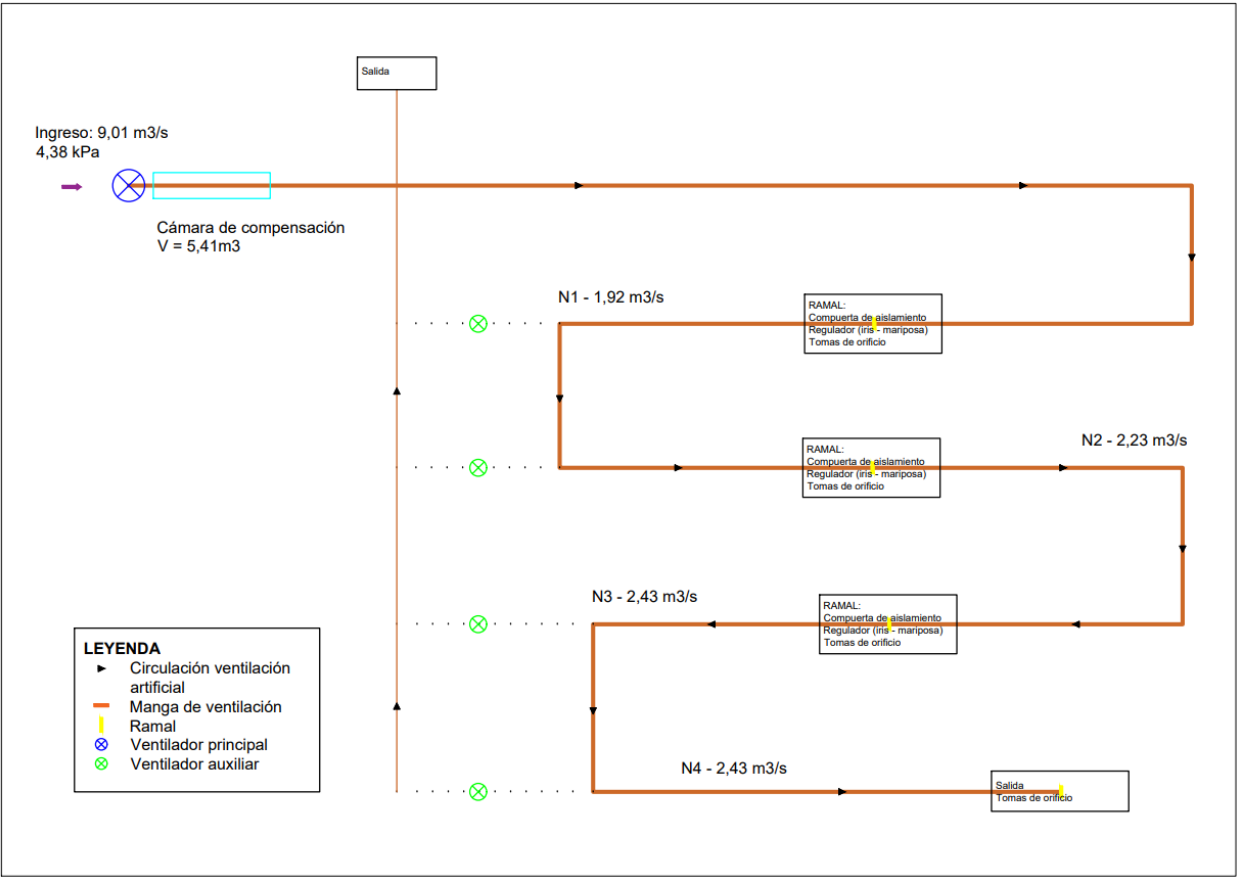
Dimensiones (m)	Volumen (m³)	V media (m/s)
r: 0,55 h: 6,9	5,40	0,43

Fuente: *Elaboración propia*

Las medidas del pulmón pueden variar de acuerdo con la disponibilidad del espacio, siempre y cuando el volumen calculado permita mantener el tiempo de residencia en el rango establecido.

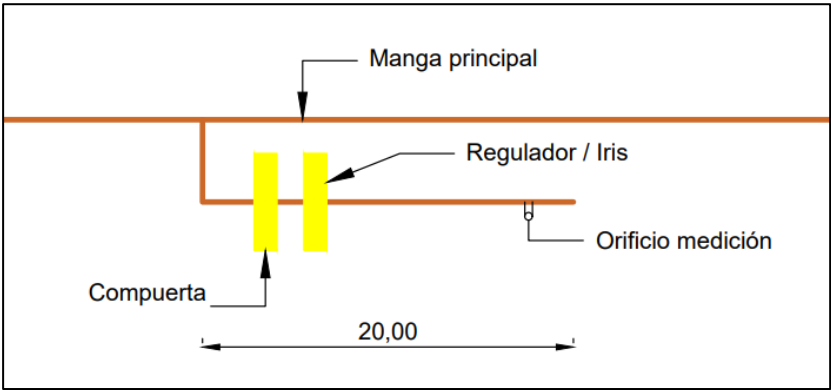
3.8. Diagrama de sistema de ventilación propuesto

Figura 6 Diseño sistema de ventilación propuesto



Fuente: Elaboración propia

Figura 7 Instalación ramal



Fuente: Elaboración propia

3.9. Presupuesto

Ítem	Medida	Cantidad	Valor Unitario	Total
Costo por ventilador				
Ventilador axial de 45 HP	Unidad	1	\$12.000,00	\$ 12.000,00
Ventilador axial de 1 HP	Unidad	4	\$ 1.000,00	\$ 4.000,00
Costo de instalación				\$ -
Accesorios	Unidad	1	\$ 8.400,00	\$ 8.400,00
Mano de obra ventilador	Unidad	4	\$ 1.000,00	\$ 4.000,00
Mano de obra manga	Unidad	2596	\$ 5,00	\$ 12.980,00
Costo de ductos				\$ -
Maga 1,10m	Metro	866,07	\$ 35,00	\$ 30.312,45
Manga 0,95m	Metro	411,37	\$ 30,00	\$ 12.341,10
Manga 0,80m	Metro	387,45	\$ 25,00	\$ 9.686,25
Manga 0,70m	Metro	20	\$ 20,00	\$ 400,00
Manga 0,60m	Metro	911,115	\$ 15,00	\$ 13.666,73
Costo instalaciones eléctricas				
Accesorios	Unidad	1	\$ 4.500,00	\$ 4.500,00
Mantenimiento anual				
Repuestos	Unidad	1	\$ 200,00	\$ 200,00
Mano de obra	Unidad	2	\$ 470,00	\$ 940,00
TOTAL				\$113.426,53

Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

El estudio realizado para el diseño de un sistema de ventilación en las labores subterráneas de la mina Minervilla, permitió optimizar dicho sistema, esto conforme a los requisitos técnicos y a las condiciones presentes en el diseño de explotación.

El sistema de ventilación actual de la mina presenta inconvenientes para cumplir con la demanda de aire necesario para desarrollar las diversas labores mineras, ya sea por fugas en la tubería, pérdidas de presión y fricción, caudal insuficiente, entre otros.

Para mejorar la capacidad de ventilación hacia los frentes de exploración y explotación, se propuso el diseño de un nuevo sistema de ventilación, que tendrá como principal objetivo la disipación de gases y una correcta alimentación de aire para los trabajadores. Los gases presentes en las labores mineras son: monóxido de carbono, polvo debido a la voladura y dióxido de nitrógeno.

En el circuito a través de un ventilador principal, se inyectará un caudal de $9.01\text{m}^3/\text{s}$; el aire ingresa a una cámara de compensación para asegurar que el flujo no sea turbulento y mantener la presión hacia las mangas. A medida que avanza, recorre el nivel 0 hasta llegar al nivel 1 en donde se libera un caudal de $1,92\text{ m}^3/\text{s}$. Luego, continua hacia el nivel 2, donde se libera un caudal de $2,23\text{m}^3/\text{s}$. En el nivel 3 se libera $2,43\text{ m}^3/\text{s}$. Finalmente, en el nivel 4 se libera el restante que es $2,43\text{ m}^3/\text{s}$. En cada nivel se instalará un ventilador auxiliar que expulsará el aire viciado a través de una manga hacia la superficie.

El costo de ventilación mediante los equipos instalados en los cuatro niveles, asciende a la suma de \$113.426,53. Este costo incluye la compra de ventiladores principales y auxiliares, así como la adquisición de mangas y demás elementos necesarios para garantizar un flujo de aire eficiente.

Recomendaciones

La instalación del sistema deberá ser realizada por técnicos especializados, asegurando la integridad de las conexiones y minimizando el riesgo de pérdidas o fugas en el sistema de ventilación.

El sistema debe tener un plan de mantenimiento predictivo, preventivo y correctivo, con el fin de minimizar pérdidas por fugas y deterioro del material.

Se deberá realizar mediciones constantes del caudal, presión y concentración de gases, esto permitirá ajustar la operación de los ventiladores y garantizar condiciones seguras de trabajo.

Sería conveniente utilizar sistemas computacionales para evaluar la eficiencia del flujo en diferentes escenarios de operación y proponer mejoras en la geometría de los ductos o la ubicación de los ventiladores, de ser el caso.

Analizar la relación entre la calidad del aire, la exposición de los trabajadores a contaminantes y la productividad, con el objetivo de fortalecer normas internas de seguridad ocupacional.

Investigar el uso de energías renovables para alimentar parte del sistema de ventilación, contribuyendo a la reducción del impacto ambiental y de los costos operativos a mediano y largo plazo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASHRAE. (1997). *Handbook of Fundamentals*. Atlanta: ASHRAE, Inc.
- Auccasio, R. (2020). *Libro de Ventilación de Minas*. Obtenido de Calameo:
<https://www.calameo.com/books/005959280d56e0fe62ce5>
- Bedoya, A. M. (1961). *dspace*. Obtenido de
<http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/17951/1/El%20Cojitambo.pdf>
- Calizaya, F. (2022). *Instalación de ventiladores y controles de ventilación en*. Utah: Revista de Medio Ambiente y Minería.
- Colombia, A. d. (s.f.). *Agencia Nacional de Minería* . Obtenido de chrome-extension://efaidnbmninnibpcajpcglclefindmkaj/<https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/Decalogo-de-ventilacion-anm-AIMC-UN-20-05-2021.pdf>
- Córdoba, C., & Molina, J. (2011). CARACTERIZACIÓN DE SISTEMAS DE VENTILACIÓN EN MINERÍA SUBTERRÁNEA. *BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA*, 77-86.
- Co., C. (1982). *Flow of Fluides - Through valves, fittings and pipes* . New York .
- Equipartes. (2023). *Qué son y para qué sirven los ductos de ventilación en minería subterránea*. Obtenido de <https://equipartes.com.co/blog/que-son-y-para-que-sirven-los-ductos-de-ventilacion-en-mineria-subterranea?utm.com>
- Gallardo, S. A. (2008). *GUÍA METODOLÓGICA DE SEGURIDAD PARA VENTILACIÓN DE MINAS*. Santiago de Chile: SERNAGEOMIN.
- Gonzales, A. O., & Pozo, A. R. (12 de 2015). *Inestabilidad del terreno en zonas urbanas de Zaruma y Portovelo*. Obtenido de
https://www.researchgate.net/publication/324507378_Inestabilidad_del_terreno_en_z

onas_urbanas_de_Zaruma_y_Portovelo_Ecuador_Factores_condicionantes_y_desen-
denantes

Hartman, H. L., Mutmanský, J. M., Ramani, R. V., & Wang, Y. (1977). *Mine Ventilation and Air Conditioning*. New York: JOHN WILEY & SONS, INC.

Herbert, J. H. (2019). *Introducción a la ventilación minera*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

Hurtado Cruz, J. P. (2019). *MANUAL METODOLÓGICO PARA LA VENTILACIÓN DE MINAS*. Santiago de Chile : Universidad Santiago de Chile .

Idelchik, I. E. (1994). *Handbook of Hydraulic Resistance*. Jerusalem .

Ingenium. (10 de Abril de 2023). *Ingenium*. Obtenido de

<https://ingenium.edu.pe/blog/mineria/mineria-subterranea-definicion-y-ventajas/>

Malcolm, M. (s.f.). *Subsurface Ventilation Engineering*.

Manual de Residuos Industriales Mineros. (2015). Granulometría en porcentaje de paso de malla.

Mejía, M., Morales, K., & Chacha, D. (2020). SISTEMA DE VENTILACIÓN PARA LABORES SUBTERRÁNEAS DE LA EMPRESA PRODUMIN S.A. . *Conciencia Digital*, 154-168.

Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuicultura y Pesca. (2015). *Levantamiento de Cartografía Temática Escala 1:25.000, Lote 2*.

Neyra, C. R. (2021). *SISTEMA DE VENTILACIÓN EN EL NIVEL 2735 DE LA MINA SAN JORGE – SAYAPULLO – LA LIBERTAD 2020*. Trujillo: Universidad Privada del Norte.

Ricse, R. (2021). Diseño del circuito de ventilación para evacuar los gases, humo y polvo en suspensión en las labores de la galería principal en la mina artesanal Aurex-Acopalca, Pasco 2018. (pág. 114). Huancayo: Universidad Continental.

S&P. (2017). *Ventiladores axiales: qué son, características y prestaciones*. Obtenido de <https://www.solerpalau.com/blog/es-es/ventiladores-axiales-que-son/?utm.com>

Smoot, R. (2022). *Comparación de ventiladores axiales y centrífugos*. Obtenido de https://www.digikey.es/es/articles/comparing-axial-fans-and-centrifugal-fans?srsId=AfmBOoqgygB6gyf_M1hcVi0W0vFbLIt90yObIdb4swtx-eIOM67rV-rd&utm.com

ToolBox, E. (2024). *Minor loss coefficients in air ducts – equivalent length and resistance coefficient*. Obtenido de The Engineering ToolBox: https://www.engineeringtoolbox.com/minor-loss-air-ducts-fittings-d_208.html?utm_source=chatgpt.com

Zaldumbide, M. (2014). *Fundamentos de "Explotación Subterránea"*. Quito.

ZITRON. (2010). *VENTILACIÓN DE MINAS*. Gijón .

ANEXOS

Anexo 1. Ubicación empresa Minervilla Cía. Ltda.

