

**UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



Tesis

Diseño óptimo del circuito de ventilación en labores de preparación y explotación de la  
U.O. Pampamarquino – Aymaraes, 2023

Presentado por:

Leonel Ortiz Ramirez

Marco Antonio Puma Robles

Para optar el título profesional de Ingeniero de Minas

Abancay, Perú

2023



UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



TESIS

**Diseño óptimo del circuito de ventilación en labores de preparación y explotación de la U.O. Pampamarquino – Aymaraes, 2023**

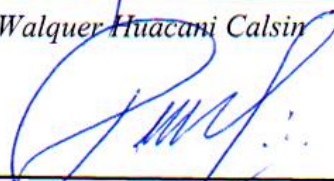
Presentado por **Marco Antonio Puma Robles** y **Leonel Ortiz Ramirez**, para optar el título: Ingeniero de Minas

Sustentado y aprobado el 16 de setiembre de 2024 ante el jurado evaluador:

**Presidente:**

  
\_\_\_\_\_  
*Dr. Walquer Huacani Calsin*

**Primer miembro:**

  
\_\_\_\_\_  
*Mtro. Feliciano Escobedo Silva*

**Segundo miembro:**

  
\_\_\_\_\_  
*Mtro. Dario Dante Sanchez Castillo*

**Asesores:**

  
\_\_\_\_\_  
*Dr. Nelson Palemon Meza Peña*



---

## CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD N° 167-2024

La Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, a través de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería declara que, la Tesis intitulada: **Diseño óptimo del circuito de ventilación en labores de preparación y explotación de la U.O. Pampamarquino – Aymaraes, 2023**, presentado por el Bach. Marco Antonio Puma Robles, 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 **(12%)** por lo que, cumple con los criterios de originalidad establecidos por la Universidad.

Abancay, 06 de setiembre del 2024

 UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS  
DE APURIMAC  
  
**Dr. Lintol Contreras Salas**  
DIRECTOR(E) DE LA UNIDAD DE INVESTIGACION  
FACULTAD DE INGENIERIA

C. c.  
Archivo  
REG. N° 637



## **Agradecimiento**

*Agradezco respectivamente a mis padres Marcos y Jesusa por este significativo esfuerzo de haberme guiado en todo lo posible, de igual manera a mi asesor por guiarme en los pasos necesarios para efectuar este respectivo trabajo de investigación*

***Marco Antonio Puma Robles***

*A familia y especialmente a mis padres Angelino e Hilda por haberme apoyado en todo, de igual manera a mi asesor por guiarme en los pasos necesarios para efectuar este respectivo trabajo de investigación*

***Leonel Ortiz Ramirez***



## **Dedicatoria**

*A mi querida hija Isabel por ser la fuente de inspiración en este proceso de superación personal, A la memoria del Dr. Freddy Vega Loayza que en paz descansa*

***Marco Antonio Puma Robles***

*Para mis padres Angelino e Hilda, ellos me dieron la base para poder llegar a ser quien soy ahora, por su motivación y ayuda fraternal en cada etapa de mi formación académica*

***Leonel Ortiz Ramirez***



Diseño óptimo del circuito de ventilación en labores de preparación y explotación de la  
U.O. Pampamarquino – Aymaraes, 2023  
Línea de investigación: Minería y procesamiento de minerales

Esta publicación está bajo una Licencia Creative Commons



## ÍNDICE

	<b>Pág.</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>RESUMEN</b>	3
<b>ABSTRACT</b>	4
<b>CAPÍTULO I</b>	5
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	5
1.1 Descripción del problema	5
1.2 Enunciado del Problema	6
1.2.1 Problema general	6
1.2.2 Problemas específicos	6
1.3 Justificación de la investigación	6
<b>CAPÍTULO II</b>	9
<b>OBJETIVOS E HIPÓTESIS</b>	9
2.1 Objetivos de la investigación	9
2.2.1 Objetivo general	9
2.2.2 Objetivos específicos	9
2.2 Hipótesis de la investigación	9
2.2.3 Hipótesis general	9
2.2.4 Hipótesis específicas	10
2.3 Operacionalización de variables	11
<b>CAPÍTULO III</b>	12
<b>MARCO TEÓRICO REFERENCIAL</b>	12
3.1 Antecedentes	12
3.1.1 Antecedentes internacionales	12
3.1.2 Antecedentes nacionales	14
3.1.3 Antecedentes locales	16
3.2 Marco teórico	17
3.2.1 Ventilación	17
3.2.1.1 Ventilación natural	17
3.2.1.2 Ventilación mecánica	19
3.2.1.3 Calidad de aire	22
3.2.1.4 Cantidad de aire	22
3.2.2 Parámetros físicos de ventilación	22
3.2.2.1 Caudal	22
	I



3.2.3	Circuitos de ventilación	30
3.2.3.1	Cálculos de redes	30
3.2.4	Ventiladores en minería subterránea	34
3.2.4.1	Clasificación de ventiladores	34
3.2.4.2	Selección de ventiladores	35
3.2.4.3	Acoplamiento de ventiladores	35
3.2.5	Cálculo del requerimiento de aire	37
3.2.5.1	Cuando en la operación se utilice equipos con motor petrolero:	37
3.2.5.2	Cuando en la operación no se utilicen equipos con motor petrolero:	38
3.2.6	Decrecimiento de presión atmosférica con la altitud	40
3.2.7	Parámetros de cálculo utilizados en ventilación	42
3.2.7.1	Leyes de Kirchhoff	42
3.2.7.2	Método de Hardy Cross	43
3.2.7.3	Circuitos de ventilación	44
3.2.8	Presiones de una mina	45
3.2.9	Marco normativo nacional	45
3.2.10	Técnicas para medir la presión y caudal de la corriente de aire	46
3.2.10.1	Medición de presión en ventilación de minas	46
3.2.11	Polvo en el cuerpo humano	49
3.2.12	Control de polvo en minas	49
3.2.13	Leyes de los gases ideales	50
3.2.13.1	Ley de Boyle	50
3.2.13.2	Ley de Charles	50
3.2.13.3	Ley de Gay Lussac	51
3.2.14	Principio de Bernoulli y el cambio de energía de un fluido.	51
3.2.15	Software VentSim™ Design	53
3.3	Marco conceptual	54
<b>CAPÍTULO IV</b>		<b>58</b>
<b>METODOLOGÍA</b>		<b>58</b>
4.1	Tipo y nivel de investigación	58
4.2	Diseño de la investigación	58
4.3	Descripción ética de la investigación	58
4.4	Población y muestra	58
4.5	Procedimiento	59
4.6	Técnica e instrumentos	59
4.7	Análisis estadístico	60
<b>CAPÍTULO V</b>		<b>61</b>
<b>RESULTADOS Y DISCUSIONES</b>		<b>61</b>



5.1	Análisis de resultados	61
5.1.1	Determinación de las deficiencias del diseño actual del circuito de ventilación	61
5.1.1.1	Descripción general del sistema de ventilación	61
5.1.1.2	Indicadores de cantidad de aire en estaciones de monitoreo	61
5.1.1.3	Indicadores de calidad de aire en estaciones de monitoreo	62
5.1.2	Determinación requerimiento de aire	63
5.1.3	Propuesta de mejora en el sistema de ventilación actual	69
5.1.3.1.	Entrada de parámetros ambientales en el software Ventsim Design	69
5.1.4	Modelamiento del sistema actual de ventilación	70
5.1.5	Propuesta de mejora al corto plazo	71
5.1.6	Resultado del circuito de ventilación aplicando las mejoras a corto plazo	76
5.1.7	Cuantificación del costo de implementación del diseño del circuito	76
5.2	Contrastación de hipótesis	79
5.3	Discusión	82
<b>CAPÍTULO VI</b>		84
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>		84
6.1	Conclusiones	84
6.2	Recomendaciones	85
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA</b>		87
<b>ANEXOS</b>		90



## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1</b> —Accesibilidad para la U.O. Pampamarquino	8
<b>Tabla 2</b> —Operacionalización de las variables	11
<b>Tabla 3</b> —Valores estimados del factor de fricción para una densidad de 1.2 kg/m <sup>3</sup>	27
<b>Tabla 4</b> —Resumen de indicadores medidos en estaciones de ventilación del sistema	62
<b>Tabla 5</b> —Resumen de la concentración promedio de AQ en estaciones de monitoreo	62
<b>Tabla 6</b> —Parámetros de operación SN-4490	63
<b>Tabla 7</b> —Cálculo de requerimiento de aire por personal	64
<b>Tabla 8</b> —Cálculo de requerimiento de aire por madera	65
<b>Tabla 9</b> —Cálculo de requerimiento de aire por temperatura	66
<b>Tabla 10</b> — Cálculo de requerimiento de aire por consumo de explosivo	66
<b>Tabla 11</b> — Cálculo de requerimiento de aire por fugas	67
<b>Tabla 12</b> — Cálculo de requerimiento de aire total	67
<b>Tabla 13</b> — Cálculo del balance de aire SN-4490	68
<b>Tabla 14</b> — Configuración de parámetros ambientales	69
<b>Tabla 15</b> — Correlación de datos del sistema actual de ventilación en Ventsim Design	70
<b>Tabla 16</b> — Resumen sobre la red del sistema del sistema de ventilación actual	70
<b>Tabla 17</b> — Tabla resumen sobre la red del sistema de ventilación a corto plazo	76
<b>Tabla 18</b> — CAPEX en proyectos a corto plazo	77
<b>Tabla 19</b> — OPEX en proyectos a corto plazo versus situación actual	78
<b>Tabla 20</b> — Resumen de costos de inversión y operación	78
<b>Tabla 21</b> — Variables e indicadores de hipótesis general.	79
<b>Tabla 22</b> — Base de datos utilizada	80
<b>Tabla 23</b> — Prueba de normalidad de las variables	80
<b>Tabla 24</b> — Correlación de variables	81
<b>Tabla 25</b> — Prueba de muestras	82



## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1</b> — Ubicación de la U.O. Pampamarquino	7
<b>Figura 2</b> — Ejemplo de ventilación natural en minas.	18
<b>Figura 3</b> — Ventilación secundaria	21
<b>Figura 4</b> — Sección de geometría trapezoidal	25
<b>Figura 5</b> — Sección con arco metálico	25
<b>Figura 6</b> — Sección del NV 4490	26
<b>Figura 7</b> — Circuitos en serie	32
<b>Figura 8</b> — Circuito en paralelo	33
<b>Figura 9</b> — Sistema de ventilación en la U.O. Pampamarquino	35
<b>Figura 10</b> — Acoplamiento de aire	36
<b>Figura 11</b> — Acoplamiento en paralelo	36
<b>Figura 12</b> — Presión atmosférica a altitud diferente	40
<b>Figura 13</b> — Presión atmosférica vs Altitud	41
<b>Figura 14</b> — Representación de la primera ley de Kirchhoff	42
<b>Figura 15</b> — Representación de la segunda ley de Kirchhoff	43
<b>Figura 16</b> — Barómetro aneroide	47
<b>Figura 17</b> — Diferencia de presión a ambos lados de una compuerta estanca	48
<b>Figura 18</b> — Diferencia de presión entre dos puntos	49
<b>Figura 19</b> — Flujo de un fluido mostrando relaciones de energía	52
<b>Figura 20</b> — Multímetro AMF035 y detector multi gas MSA Alt air 4X	53
<b>Figura 21</b> — Vista del software con el modelo tridimensional de las labores	54
<b>Figura 22</b> — PQ_8261	72
<b>Figura 23</b> — PQ8261	72
<b>Figura 24</b> — Características y curva de ventilador principal VAV-32-14	73
<b>Figura 25</b> — VAV-32-14	73
<b>Figura 26</b> — Características y curva de ventilador principal VAV-32-14	74
<b>Figura 27</b> — CX_4480	75
<b>Figura 28</b> — Cortinas de ventilación	75
<b>Figura 29</b> — Comparación de costos proyectos a corto plazo versus la situación actual	79
<b>Figura 30</b> — Plano de ubicación	93



<b>Figura 31</b> — Plano topográfico Nv_4490	94
<b>Figura 32</b> — Vista del ventilador principal	95
<b>Figura 33</b> — Ingreso por la bocamina para posterior medición	95
<b>Figura 34</b> — Fotografía aérea del campamento de la U.O. Pampamarquino	96
<b>Figura 35</b> — Vista de una galería con su manga de ventilación.	96
<b>Figura 36</b> — Monitorización de gases y medición	97
<b>Figura 37</b> — Posterior procesamiento de los datos obtenidos para simulación	97
<b>Figura 38</b> — Resultado de monitoreo de gases.	98
<b>Figura 39</b> — Visualización de las labores .proyectadas en color azul	98

## INTRODUCCIÓN

La ventilación puede ser definida como el control de dirección y cantidad del flujo de aire a través de las labores mineras de una operación. Un adecuado sistema de ventilación dentro de las labores mineras permitirá cuidar la integridad de los colaboradores, mejorar el rendimiento de trabajo en las actividades mineras y mejorar la productividad de la mina.

La Unidad Operativa Pampamarquino, presenta dificultades con el suministro de aire con el diseño actual del circuito de ventilación para sus labores de explotación, uno de los principales problemas que se tienen es la deficiencia del caudal de aire para el subnivel 4490, el cual viene presentando un promedio de temperatura por guardia elevada, así como una alta concentración de gases producto de la voladura y polvos producidos para los procesos de perforación, carguío y acarreo. Estos problemas generan malestar en los colaboradores, asimismo una baja producción del tajeo 6420.

La presente investigación tiene por objetivo realizar un nuevo diseño del circuito de ventilación para mejorar las condiciones de trabajo en las labores de preparación y desarrollo de la U.O. Pampamarquino, el cual presenta los siguientes capítulos:

**Primer capítulo.** Se emplaza los temas que inicializan el planteamiento el problema, donde se desarrollara una breve descripción y justificación de este trabajo de investigación, para de esta forma precisar el caudal de aire a través de cálculos matemáticos,

**Segundo capítulo.** Se plantea los objetivos, la formulación de hipótesis y la operacionalización de las variables como consecuencia de este análisis que nos conducirá a la identificación de los parámetros principales que regirán la presente investigación.

**Tercer capítulo.** Se desarrolla un marco teórico que puede servir de referencia, donde se plantean las bases para el desarrollo y determinación de la actual investigación, entre el contexto local, nacional e internacional relacionadas con nuestro tema de investigación.

**Cuarto capítulo.** Se muestra la metodología con una investigación del tipo predictivo a un nivel de aplicación y siguiendo un diseño no experimental sobre una muestra determinada de forma intencional direccionada no aleatoria.



**Quinto capítulo.** Se examina los resultados y discusiones obtenidas en el trabajo de investigación de acuerdo a los objetivos planteados, cuyos resultados servirán para la optimización en el circuito de ventilación que involucra al sub nivel 4490 y al tajeo de explotación TJ 6420.

**Sexto capítulo.** El contenido de este capítulo consta de las conclusiones y recomendaciones del presente trabajo de investigación.



## RESUMEN

La ventilación en la minería implica regular el flujo de aire en las operaciones subterráneas, y un sistema de ventilación eficiente no solo garantiza la seguridad de los trabajadores, sino que también optimiza su desempeño y la productividad general de la mina. La unidad minera Pampamarquino enfrenta desafíos en el subnivel SN-4490 existe una insuficiente velocidad del flujo de aire en las salidas de los ductos, además de las elevadas temperaturas y niveles de humedad en el área de trabajo, lo que afecta en el desarrollo de labores, así como la explotación de tajeos como el TJ-6420. El objetivo de la presente investigación es mejorar el diseño del circuito de ventilación para garantizar la cantidad y calidad de aire necesarias en las operaciones de preparación y explotación en la U.O. Pampamarquino. Empleando una metodología de investigación predictivo y de nivel aplicativo, se buscar predecir los resultados en cuanto a requerimiento de aire del circuito de ventilación en estudio aplicando el procedimiento que la investigación describe. Para ello, se identificó las deficiencias en el diseño actual del circuito de ventilación, determinó los requisitos de cantidad y calidad de aire para el confort de las operaciones, y cuantificó el costo de implementar el nuevo diseño para cumplir con los requisitos de aire en las actividades de preparación y explotación. Las acciones propuestas al corto plazo, incluyen la culminación del proyecto del pique PQ\_8261, la reubicación de ventiladores, la incorporación de nuevos ventiladores, la construcción de labores auxiliares, entre otros. Por otra parte, se llegó a la conclusión de que con la aplicación de estos trabajos la cobertura de aire mejora de un 89.64% a un 118% de acuerdo al requerimiento de aire calculado con base en el Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería. Finalmente, se determinó que la implementación de estas mejoras a corto plazo involucra un costo de inversión de 93512 US\$ y un costo de operación de 209181 US\$/año.

**Palabras clave:** *Diseño, Explotación, minería, operaciones subterráneas, ventilación.*



## ABSTRACT

Ventilation in mining involves regulating airflow in subway operations, and an efficient ventilation system not only ensures the safety of workers, but also optimizes their performance and the overall productivity of the mine. The Pampamarquino mining unit faces challenges in the SN-4490 sublevel where there is insufficient air flow velocity at the duct exits, in addition to high temperatures and humidity levels in the work area, which affects the development of work, as well as the exploitation of pits such as TJ-6420. The objective of the present investigation is to improve the design of the ventilation circuit to guarantee the necessary quantity and quality of air in the preparation and exploitation operations at the U.O. Pampamarquino. Using a predictive and application-level research methodology, we seek to predict the results in terms of air requirements of the ventilation circuit under study by applying the procedure described in the research. To this end, the deficiencies in the current design of the ventilation circuit were identified, the air quantity and quality requirements for the comfort of the operations were determined, and the cost of implementing the new design to meet the air requirements in the preparation and exploitation activities was quantified. The proposed short-term actions include the completion of the PQ\_8261 pit project, the relocation of fans, the incorporation of new fans, the construction of auxiliary works, among others. On the other hand, it was concluded that with the implementation of these works the air coverage improves from 89.64% to 118% according to the air requirement calculated based on the Occupational Health and Safety Regulation in Mining. Finally, it was determined that the implementation of these improvements in the short term involves an investment cost of US\$93512 and an operating cost of US\$209181/year.

**Keywords:** *Design, Exploitation, mining, underground operations, ventilation.*



## CAPÍTULO I

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 1.1 Descripción del problema

El sistema de ventilación de minas es uno de los módulos más críticos en un proyecto de minería subterránea (KARAGIANNI Y BENARDOS, 2021) debido a que asegura el aporte de oxígeno necesario para la respiración de los colaboradores y la operación de equipos aeróbicos (Wang et al., 2022), así mismo diluye y elimina sustancias dañinas, generalmente presentes son los gases tóxicos y dañinos productos de la voladura con explosivos encartuchados o emulsiones y polvos de material estéril y mineral generados por el proceso de perforación, carguío y acarreo, sostenimiento, entre otros.

Otro aspecto importante del control del sistema de ventilación dentro de labores mineras es mantener las condiciones ambientales adecuadas, debido a que la transferencia del calor de la superficie de la roca al flujo de aire suministrado a la labor, combinado con el calor y emanación de gases producidos por los equipos Diesel durante las operaciones de explotación, pueden crear un ambiente cargado de calor intolerable y humedad que impacta negativamente en el rendimiento de las operaciones, reduce la productividad, y más importante afecta la seguridad de los colaboradores (XIN ET AL., 2022).

La Unidad Operativa Pampamarquino es una mina subterránea artesanal que es operada por la Asociación de Mineros Artesanales Pepas de Oro Pampamarca en la provincia de Aymares, región Apurímac, Perú. Actualmente la unidad presenta dificultades para el trabajo en el subnivel SN-4490 y el tajeo TJ-6420, de los cuales se explota mineral aurífero mediante el método de explotación por corte y relleno ascendente. El circuito de ventilación diseñado para las labores mencionadas es alimentado a través de un pique de 60 metros, el cual forma parte del sistema de ventilación de la unidad operativa, que contempla un ventilador auxiliar extractor ubicado en la intersección del pique y el subnivel SN-4490, el suministro de aire hacia el subnivel es a través de dos ductos de ventilación (mangas de 38” de diámetro) que parten a través de una conexión en “Y”



hacia la labor de tajeo en cuestión. El problema identificado es la baja velocidad de aire en las salidas de los ductos, además de la alta sensación térmica y humedad en la labor.

## 1.2 Enunciado del Problema

### 1.2.1 Problema general

¿Cómo optimizar el diseño del circuito de ventilación para la cobertura de aire en cantidad y calidad requerido por las labores de preparación y explotación de la U.O. Pampamarquino – Aymaraes, 2023?

### 1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cuáles son las deficiencias del diseño actual del circuito de ventilación para las labores de preparación y explotación de la U.O. Pampamarquino – Aymaraes, 2023?
- ¿Cuál es la cobertura de aire en calidad y cantidad requeridas por las labores de preparación y explotación de la U.O. Pampamarquino – Aymaraes, 2023?
- ¿Cuál es el costo de implementación del diseño del circuito de ventilación para la cobertura de aire requeridas por las labores de preparación y explotación de la U.O. Pampamarquino - Aymaraes, 2023?

## 1.3 Justificación de la investigación

La investigación es de gran importancia, ya que permitirá optimizar el circuito actual de ventilación de la Unidad Minera Pampamarquino para cubrir el requerimiento de aire en cantidad y calidad necesarias en el subnivel SN-4490 y el tajeo TJ-6420. El cumplimiento del aire requerido permitirá una mejora en las condiciones ambientales de las labores, reduciendo así el riesgo de accidentes en los colaboradores, un incremento del rendimiento de los procesos de ventilación, sostenimiento, perforación, voladura, carguío y acarreo en las labores, así como el aumento en la productividad de la explotación del mineral en el tajeo.

La propuesta del nuevo diseño reducirá los costos de la unidad operativa a Corto plazo, debido a la reducción de tiempos de espera para ventilación, tiempos muertos en las



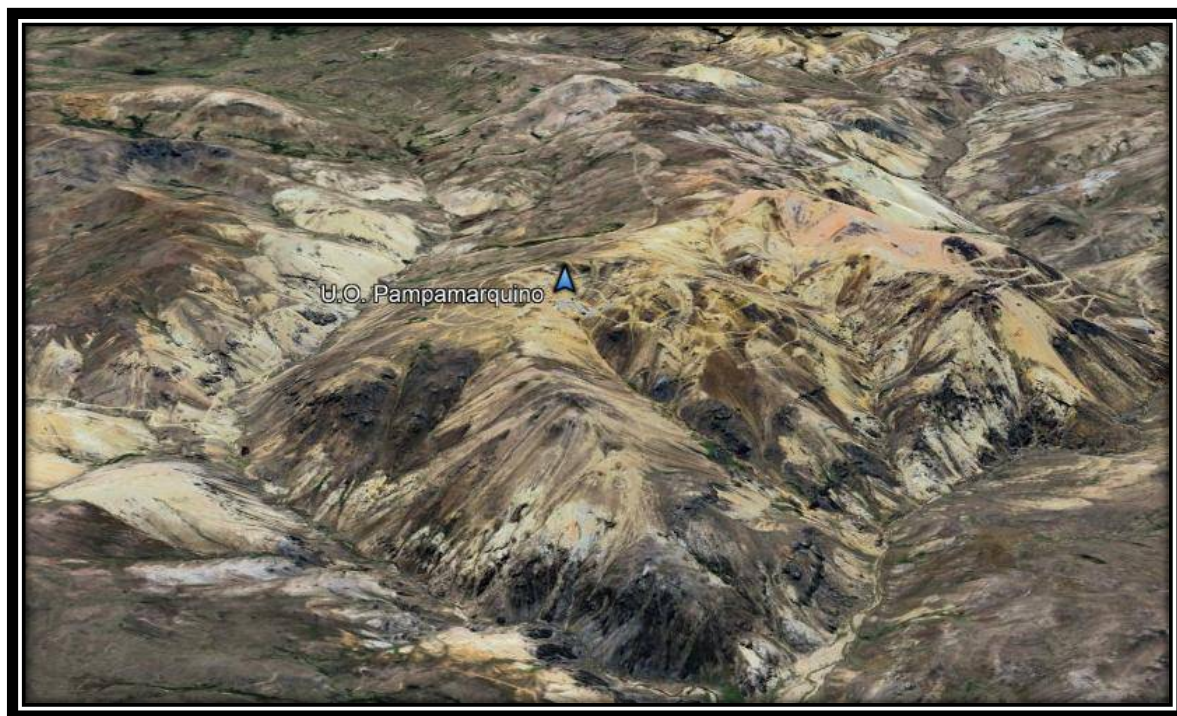
operaciones de explotación, e incremento del rendimiento de los trabajadores en los procesos descritos.

## 1.4 Ubicación y accesibilidad

### 1.4.1 Ubicación

La Asociación de Mineros Artesanales Pepas de Oro-U.M Pampamarquino, es una empresa Aymarina que se dedica a la venta y producción de metales.

La U.M. Pampamarquino está ubicado en el anexo de Pampamarca, distrito de Cotaruse, provincia de Aymaraes en el departamento de Apurímac, está a altitud de 4560 m.s.n.m. ubicado en coordenadas UTM WGS84 18L 698109.02 m E 8386361.98 m S



**Figura 1 — Ubicación de la U.O. Pampamarquino**

### 1.4.2 Accesibilidad

La vida de accesibilidad a la Unidad Operativa Pampamarquino, desde la ciudad de Abancay, Se transita por carretera pavimentada hasta la localidad de Promesa, donde se toma un desvío que conduce directamente a la Unidad Operativa Pampamarquino. El trayecto total, de unos 194.5 kilómetros, se cubre en un lapso de 4 a 5 horas en automóvil.

**Tabla 1 — Accesibilidad para la U.O. Pampamarquino**

TRAMO	DISTANCIA (KM)	TIPO DE VÍA
Abancay - Promesa	152	Asfaltada
Promesa – U.O. Pampamarquino	42.5	Trocha carrozable
TOTAL	194.5	



## CAPÍTULO II

### OBJETIVOS E HIPÓTESIS

#### 2.1 Objetivos de la investigación

##### 2.2.1 Objetivo general

Optimizar el diseño del circuito de ventilación para la cobertura de aire en cantidad y calidad de aire requeridas para las labores de preparación y explotación de la U.O. Pampamarquino – Aymaraes, 2023.

##### 2.2.2 Objetivos específicos

- Determinar las deficiencias del diseño actual del circuito de ventilación para las labores de preparación y explotación de la U.O. Pampamarquino – Aymaraes, 2023.
- Calcular el requerimiento de aire en calidad y cantidad necesarias para el confort en las labores de preparación y explotación de la U.O. Pampamarquino – Aymaraes, 2023.
- Cuantificar el costo de implementación del diseño del circuito de ventilación para la cobertura de aire requeridas por las labores de preparación y explotación de la U.O. Pampamarquino – Aymaraes, 2023.

#### 2.2 Hipótesis de la investigación

##### 2.2.3 Hipótesis general

La optimización de diseño del circuito de ventilación cumple con la cobertura de aire en cantidad y calidad de aire requerido por las labores de preparación y explotación de la U.O. Pampamarquino - Aymaraes, 2023.



#### 2.2.4 Hipótesis específicas

- Existe relación entre las deficiencias del diseño del circuito de ventilación actual y el requerimiento de aire en las labores de preparación y explotación de la U.O. Pampamarquino – Aymaraes, 2023.
- Existe relación entre el requerimiento de aire en calidad y cantidad necesarias y el confort en las labores de preparación y explotación y el confort en las labores de preparación y explotación de la U.O. Pampamarquino - Aymaraes, 2023
- El costo de implementación del diseño del circuito óptimo es menor a Corto plazo que el costo operativo del diseño de circuito de ventilación actual para la cobertura de aire requerido por las labores de preparación y explotación de la U.O. Pampamarquino – Aymaraes, 2023.

### 2.3 Operacionalización de variables

**Tabla 2 — Operacionalización de las variables**

	Nombre	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Índices
Variable 1	Diseño del circuito de ventilación	Se refiere al cálculo de la red de ventilación para determinar el reparto de caudal de aire que debe ingresar a la mina, entre sus diferentes labores mineras: piques, galerías, subniveles, tajeos, chimeneas, entre otros. (Herrera, 2019)	Eficiencia	- Eficiencia de ventilación - Eficiencia térmica	% %
			Evaluación económica	OPEX CAPEX	US US
Variable 2	Cobertura de aire	La cobertura de aire en calidad asegura que los contaminantes gases y polvos producidos durante la operación no rebasen los niveles tolerables y permisibles. (Howard et al., 1961)	Calidad de aire	- Concentración de oxígeno - Concentración de gases contaminantes (CO <sub>2</sub> , CO, NO <sub>x</sub> , N <sub>2</sub> , Otros) - Concentración de polvos (PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> )	Ppm ppm ppm
		La cobertura de aire en cantidad necesaria asegura el requerimiento mínimo de caudal de aire en las labores mineras a través de la magnitud regulación y dirección de corriente de aire. (Howard et al., 1961)	Cantidad de aire	- Caudal de aire - Presión de aire - Resistencia	cfm Pa Ns <sup>2</sup> /m <sup>8</sup>



## CAPÍTULO III

### MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

#### 3.1 Antecedentes

##### 3.1.1 Antecedentes internacionales

Nematollahi (2021) en su trabajo titulado: “Mine ventilation circuits in an underground mine of northern Italy”, logró descubrir una solución de sistema de ventilación eficaz y global para la mina de creta de Murisengo, situada en el norte de Italia. Inicialmente, exploramos el contexto histórico de la ventilación y examinamos los diversos métodos empleados a lo largo del tiempo. Posteriormente, analizamos las razones de la necesidad de ventilación y destacamos las ventajas y beneficios de implantar un sistema de ventilación funcional, examinamos los circuitos de ventilación que se utilizan actualmente en todo el mundo. Se analiza los dispositivos utilizados para la ventilación, entre los que se incluyen diferentes tipos de ventiladores, puertas de aire, esclusas, reguladores y otros. Posteriormente, nos adentramos en el examen de otras características y propiedades específicas de la mina de Murisengo, así como de la maquinaria presente en ella. El modelo se desarrolló con el programa de diseño Ventsim. Además, examinamos la hipótesis de que se produjera un incendio en varios lugares de la mina para evaluar las condiciones en las distintas vías de ventilación durante un suceso de este tipo. Por último, presentamos varias ideas y recomendaciones significativas para posibles mejoras futuras.

Karagianni et al. (2021) en su trabajo: Ventilation Design Modeling and Optimization for an Underground Bauxite Mine; la ventilación de las explotaciones mineras subterráneas de bauxita plantea importantes retos debido a la compleja naturaleza del entorno. Este artículo se centra en la creación de un modelo detallado de la intrincada red de ventilación subterránea. La red y sus atributos específicos se eligen y construyen cuidadosamente con el software, y posteriormente se calibran y validan



con mediciones reales de aire obtenidas en la mina. Este modelo sirve de base para el desarrollo de un nuevo diseño de ventilación para la próxima ampliación de la mina. Como conclusión, se ofrece una presentación exhaustiva de las recomendaciones y características específicas necesarias para la optimización del nuevo diseño propuesto.

Maleki et al. (2018) en su proyecto, logra minimizar los costes de ventilación y mejorar la eficiencia general. La optimización de la regulación del flujo de aire en las redes de ventilación de minas se analiza como un modelo de minimización. A continuación, se simula el mismo sistema de ventilación utilizando el programa informático VENTSIM 3D. Los resultados obtenidos de la simulación por ordenador demuestran una fuerte correlación entre el método manual y el enfoque de simulación, validando la fiabilidad de los resultados de la simulación. Para ello se determinó la ubicación óptima del ventilador y los reguladores. Los resultados de esta investigación revelaron mejoras significativas. Por otra parte, el ventilador propuesto demostró una mayor eficiencia global a partir de las observaciones realizadas.

Castillo (2017) en su trabajo: Evaluación del sistema de ventilación de la mina el Roble, este estudio se centra en el examen del sistema de ventilación, que incluye un análisis del circuito de la mina, así como mediciones y cálculos del flujo de aire actual en función de las operaciones mineras. Además, el estudio pretende determinar las necesidades de aire, abordar los problemas relacionados con la temperatura y evaluar la contaminación por gases resultante de actividades como las voladuras, la carga y el transporte de materiales. Estas interrupciones se deben principalmente a fallos y errores que, cuando se resuelven, no sólo requieren una inversión financiera, sino que también se traducen en mejoras sustanciales de la productividad de la empresa.

(FUENTES, 2019) , menciona en su tesis: “Modelamiento del sistema de ventilación y control de Metano con el simulador "VENTSIM" en la mina subterránea de carbón fezmine, Polonia” para la obtención de la licenciatura de ingeniero de minas en la Universidad de Concepción de Polonia, El objetivo central de esta investigación fue desarrollar un sistema de ventilación adecuado para las condiciones específicas de la mina subterránea de carbón FezMine. A través de una metodología cuantitativa no experimental, se emplearon herramientas de simulación como Ventsim para analizar la distribución del metano en los diferentes sectores de la mina. Los resultados



obtenidos permitieron evaluar la efectividad del sistema de ventilación actual y proponer mejoras para garantizar la seguridad de los trabajadores al diluir las concentraciones de metano.

(LEIVA BUSTAMANTE, 2020), en su tesis de grado, abordó el desafío de optimizar los sistemas de ventilación en minas subterráneas mediante el uso de herramientas de inteligencia artificial. Al analizar las crecientes exigencias de la industria minera, relacionadas con la profundidad de las explotaciones y la necesidad de garantizar ambientes de trabajo seguros, el autor desarrolló modelos predictivos que permiten controlar de manera precisa el flujo de aire en minas de caving. Los hallazgos de su investigación respaldan la viabilidad de emplear la inteligencia artificial para gestionar de manera eficiente los sistemas de ventilación, contribuyendo así a reducir los riesgos laborales y optimizar los costos operativos.

En su investigación, (CARABAJO, 2015) analizó la situación de la ventilación en la mina Cabo de Hornos, resaltando la importancia de contar con un sistema de ventilación eficiente para garantizar la seguridad y productividad de las operaciones mineras subterráneas. Los resultados del estudio revelaron una significativa deficiencia en el suministro de aire fresco en las zonas más profundas de la mina, lo que pone en riesgo la salud de los trabajadores y limita la capacidad de extracción. Para solucionar este problema, se propone una ampliación del pozo Alimak Norte, con el objetivo de mejorar la circulación del aire y optimizar el sistema de ventilación en toda la mina.

### 3.1.2 Antecedentes nacionales

Gómez (2016) en su trabajo: Diseño y optimización del sistema de ventilación para mejorar el ambiente subterráneo, caso U.M. Animon - U.E.A. Chungar S.A.C., La evaluación de la red primaria y secundaria de la unidad EACH Animon se llevó a cabo entre junio y agosto. Cabe destacar que la extracción en la zona este contribuyó al 70% del caudal de aire total de la red. Se presenta una cobertura de aire del 77%, lo que actualmente no se considera crítico y está en curso de desarrollo a partir de octubre. Considerando la necesidad de un mayor desarrollo, establecer una red de descarga para futuras operaciones mineras se vuelve imperativo y esencial. En la modelización VentSim™, se selecciona estratégicamente el nivel NV-150. Durante



la modelización del proyecto, se formulan varias iniciativas de mejora dentro del circuito de ventilación. En consecuencia, esto se traduce en un ahorro anual de costes energéticos debido a la disminución del consumo de los ventiladores.

Vergaray (2017) en su trabajo: Optimización Del Sistema De Ventilación De La Mina Charito, Compañía Minera Poderosa S.A., se presenta frentes de trabajo ciegos, lo que hace necesario el uso de ventilación auxiliar. Inicialmente, se empleó un método de ventilación combinada, utilizando dos ventiladores, uno de los cuales funcionaba como extractor y el otro como ventilador de suministro. Se consideraron dos escenarios específicos: el primer escenario se centró en evaluar el caudal de aire necesario para el bienestar de las personas, mientras que el segundo escenario pretendía determinar el caudal de aire necesario para diluir los gases generados por las actividades de voladura. Al considerar el caudal de aire necesario para el personal, que asciende a 2,966 CFM, se determinó que este valor se queda corto para satisfacer las necesidades de ventilación del personal durante la fase de desarrollo, que requiere un caudal de aire total de 8,534 CFM. La evaluación reveló que los dos ventiladores de 10,000 CFM ofrecían resultados superiores. Estos ventiladores, funcionando a un ángulo de ataque de 80°, suministrarían aire fresco a varios frentes de trabajo dentro de la mina a través de conductos de ventilación de 24" x 100 m, cumpliendo eficazmente la hipótesis predeterminada.

Portilla et al. (2015) en su trabajo titulado: Propuesta técnica de mejora del sistema de ventilación principal de una operación minera subterránea polimetálica – 2015, se implicó la integración de las tareas mineras a través de chimeneas, mientras que la segunda alternativa requiere que cada tarea utilice un ventilador de 6000 CFM. La segunda alternativa supone un coste medio por hora de 1,967 dólares en los cuatro niveles. La metodología prevista incluye la recopilación de datos específicos, como mediciones sobre el terreno de las condiciones termoambientales del flujo de aire de la mina. Esta recopilación de datos facilitará un diagnóstico exhaustivo de las condiciones actuales y la formulación de propuestas de optimización. Así, la primera opción de solución, consiste en construir dos conductos "raise borer" de gran diámetro y longitud para satisfacer la demanda de aire durante la profundización de la veta principal, que representa el futuro de la mina a largo plazo. La segunda opción se centra en mejorar la eficiencia energética de los ventiladores principales optimizando la demanda de aire en función de los requisitos generales de la mina. Estas medidas de optimización bajan los costos de explotación superiores al 60%, lo



que supone un ahorro anual superior a 200.000 dólares. Además, disminuye en un 30% la presencia de agentes químicos en el aire.

(VARGAS, 2014) en su investigación sobre la mina Esperanza de Caravelí, propuso un nuevo diseño para el circuito de ventilación natural en la zona de Gisela. Los resultados obtenidos demostraron una mejora significativa en el suministro de aire fresco, incrementando el caudal de ingreso en más de 80 m<sup>3</sup>/min. Este aumento en el flujo de aire permitió cubrir las necesidades de ventilación de la zona en un 108%, garantizando así condiciones laborales más seguras y saludables para los trabajadores.

En su investigación, (SUTTY, 2016) se centró en evaluar el papel de la ventilación mecánica en la optimización de las operaciones en la mina URANO SAC, nivel 4955. A través de un estudio descriptivo, el autor concluyó que la ventilación mecánica es un factor determinante para garantizar condiciones de trabajo seguras y eficientes en la mina. Como resultado de este estudio, se implementó la instalación de dos ventiladores adicionales para mejorar la calidad del aire y aumentar la productividad.

### 3.1.3 Antecedentes locales

En el informe denominado "Estudio del sistema de ventilación para el control de agentes químicos y físicos, U.O. Pallancata - veta Pablo - 2018", Llacho y Vargas (2018), el propósito principal de esta investigación fue evaluar la eficiencia de la circulación y la eliminación de agentes producidos durante actividades del ciclo de minado. Los resultados muestran que el sistema de ventilación no cumple los requisitos de aire necesarios para eliminar y controlar con eficiencia los agentes generados por las operaciones mineras. El estudio realizado en el informe también propone una modificación del circuito de ventilación, específicamente a través de la implantación del RC 04 Pablo, que alcanzaría cubrir el 102%.

En el informe de investigación Vera (2019): "Implementación y simulación de un sistema de ventilación utilizando el software VentSim Visual en la Mina San Valentín S.A. - Curahuasi - Apurímac - 2019", teniendo como propósito mejorar el sistema de ventilación evaluando la distribución del aire en las operaciones mineras mediante la utilización del software VentSim Visual. Se implementó una simulación de los circuitos logrando calcular el caudal de aire necesario a las zonas.



Se obtuvo un caudal de aire de 4237.760 pies cúbicos por minuto (cfm), el cual no satisface los cálculos realizados en esta investigación, lo cual sugiere un caudal de 21000 cfm.

(MALLMA MUÑOZ, 2023), en su informe de investigación “Implementación del Software Ventsim Para Optimizar El Sistema de Ventilación en el Nivel Caira 4 de la Mina Huinac Huaraz - 2023” analiza las variables dependientes considerando el flujo de aire en el nivel Caira 4 como también la potencia del ventilador, la velocidad de aire, temperatura, para optimizar el sistema de ventilación son los siguientes resultados el flujo de aire fresco que ingresa 2703.938 m<sup>3</sup> /min, la cobertura de caudal de aire 96.55% , velocidad de aire 386.277m/min, salida de aire viciado 555 m<sup>3</sup>/min con una temperatura 12.8 °C, de acuerdo al D.S. 024-2016-EM concluyendo en que ambas variables realizadas fueron relacionados en el circuito de ventilación aplicando el software ventsim para optimizar el sistema de ventilación

## 3.2 Marco teórico

### 3.2.1 Ventilación

La ventilación desempeña un papel vital para garantizar la seguridad del personal bajo tierra, ya que mitiga o elimina eficazmente los posibles peligros y accidentes. Al proporcionar un entorno bien ventilado, mejora significativamente la eficacia y el rendimiento operativos generales (HERRERA, 2019)

Las funciones principales de la ventilación abarcan los siguientes aspectos:

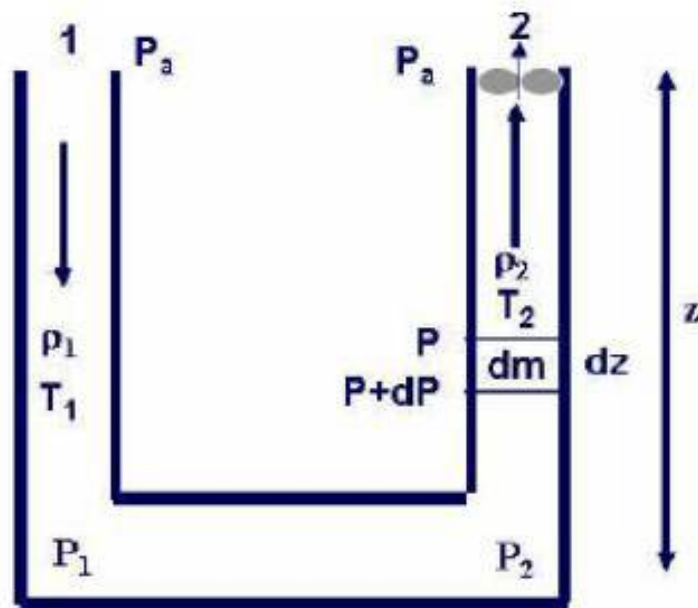
- Suministro de oxígeno suficiente para respirar.
- Regulación de una temperatura adecuada dentro de la mina.
- Dilución y extracción de las partículas de polvo generadas.

#### 3.2.1.1 Ventilación natural

El flujo de aire en la ventilación de minas se genera por la variación de densidades de aire entre las columnas de entrada y salida. Este principio es



similar al tiro que se crea en la chimenea de un hogar, que permite el movimiento ascendente del humo menos denso y caliente hacia el exterior. Consideremos una mina con un pozo de entrada de aire (n° 1) y un pozo de salida (n° 2), como se representa en la figura siguiente. Si la temperatura ( $T_1$ ) en la entrada es inferior a la temperatura ( $T_2$ ) en la salida, la densidad del aire en el pozo de entrada será superior. En consecuencia, la presión hidrostática ( $P_1$ ) en la parte inferior del eje de entrada sería mayor que la presión hidrostática ( $P_2$ ) en el eje de salida, lo que daría lugar a un flujo de aire del eje 1 al eje 2 (Howard et al., 1961)



FUENTE: Howard et al, 1961.

**Figura 2 — Ejemplo de ventilación natural en minas.**

$$\frac{P}{\rho} = \frac{RT}{M} \quad \text{Ecuación [ 1]}$$

Siendo:

P: Presión.

$\rho$  : Densidad.

T: Temperatura absoluta.

R: Constante de los gases perfectos.

M: Peso molecular.



Considerando una masa de aire elemental  $dm$  a lo largo de una longitud de pozo  $dz$

$$dP = g dz = \left( \frac{M P}{R T} \right) \cdot g dz$$

$$\frac{dP}{P} = \left( \frac{M}{R T} \right) \cdot g dz$$

Ecuación [ 2 ]

Observando el pozo

$$\int_{P_a}^{P_2} \frac{dP}{P} = \left( \frac{M g}{R T_2} \right) \cdot \int_0^z dz \qquad \ln \frac{P_2}{P_a} = \left( \frac{M g z}{R T_2} \right).$$

A la misma vez el pozo de entrada

$$\int_{P_a}^{P_1} \frac{dP}{P} = \left( \frac{M g}{R T_1} \right) \cdot \int_0^z dz \qquad \ln \frac{P_1}{P_a} = \left( \frac{M g z}{R T_1} \right).$$

Mediante el desarrollo de estas ecuaciones calcularemos los valores de  $P_1$  y  $P_2$  de las presiones absolutas en el fondo de los pozos, la diferencia de presión generada por la ventilación será:

$$\Delta P_n = P_1 - P_2 \qquad \text{Ecuación [ 3 ]}$$

### 3.2.1.2 Ventilación mecánica

Los sistemas de ventilación mecánica, que engloban diversas máquinas motorizadas, se emplean para crear corrientes de aire en las aberturas o conductos de las minas. Entre estas máquinas, los ventiladores son las más frecuentes y significativas, aunque los compresores e inyectores también encuentran utilidad en las aplicaciones de ventilación (HOWARD ET AL., 1961)

Básicamente, un ventilador funciona como una bomba de aire, generando un diferencial de presión dentro de un conducto o vía de aire para inducir el flujo de aire. En un proceso continuo, el ventilador toma aire a una determinada presión de entrada y lo expulsa a una presión superior, creando así un flujo. Como convertidor de energía, el ventilador transforma la



energía mecánica en energía fluida, suministrando la presión necesaria para superar las pérdidas que se producen durante el flujo de aire (HOWARD ET AL., 1961).

Por otra parte, los compresores de ventilación pueden considerarse ventiladores de alta presión, ya que funcionan a presiones superiores a 1 psi o 6,9 kPa. Estos compresores también funcionan como bombas de aire dentro del sistema de ventilación. Los inyectores utilizan la energía cinética del aire comprimido para aspirar aire ambiente, impartiendo principalmente energía cinética al flujo de aire. Pueden dividirse en dos categorías principales, son una parte importante de esta clasificación: ventiladores de flujo radial (centrífugos) y ventiladores de flujo axial. Los ventiladores de flujo radial funcionan aspirando aire en un impulsor giratorio y descargándolo después radialmente en una carcasa de desplazamiento en expansión (HOWARD ET AL., 1961)

#### a) Ventilación primaria

El sistema de ventilación principal de una mina se encarga de suministrar aire a las zonas de trabajo primarias. La única excepción a este circuito son las labores de preparación, situadas normalmente en el fondo de la mina, que requieren ventilación forzada auxiliar (HERRERA, 2019)

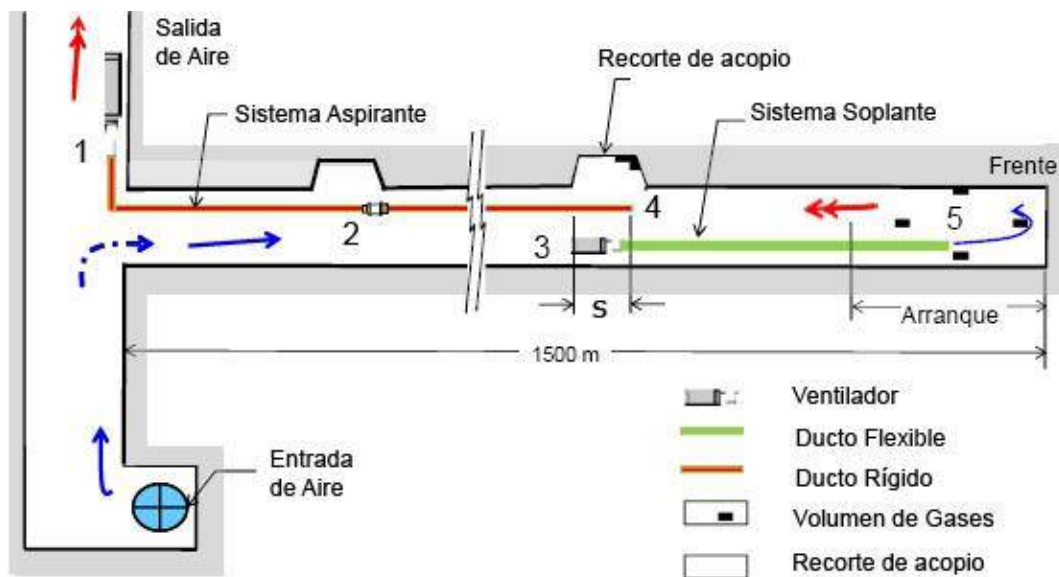
Cabe señalar que los pozos o rampas de entrada y salida, que manejan los mayores caudales, tienden a tener las mayores pérdidas de presión (representadas por  $\Delta P = RQ^2$ ). En cambio, las pérdidas de carga en las zonas de producción, que suelen tener secciones transversales más grandes, suelen ser mínimas, a menudo inferiores a 25 mm de calibre de agua. (HERRERA, 2019)

$$Pot = \Delta P \cdot Q = R \cdot Q^2 \cdot Q = R \cdot Q^3 \quad \text{Ecuación [ 4 ]}$$

#### b) Ventilación secundaria



La ventilación secundaria se refiere a los sistemas e instalaciones dedicados a proporcionar circulación de aire a zonas dentro de la mina que no están directamente afectadas por el flujo de ventilación principal. Estas zonas incluyen las secciones de avance de galerías, rampas, pozos, chimeneas y estructuras similares situadas en la parte inferior de la mina. En estas zonas, es necesario introducir aire mediante tuberías o conductos que insuflen o extraigan aire de los frentes de trabajo. (HERRERA, 2019)



FUENTE: Herrera, 2019.

**Figura 3 — Ventilación secundaria**

### c) Requisitos de aire en minería

La ventilación en una mina se convierte en una herramienta altamente adaptable para controlar y mantener la atmósfera en el interior de la misma. Existen diversas definiciones que se pueden aplicar al concepto de ventilación:

La ventilación en una mina se encarga de regular el flujo de aire para mantener una atmósfera adecuada en términos de calidad y condiciones de trabajo para los mineros. (HERRERA, 2019)



### 3.2.1.3 Calidad de aire

La atmósfera minera se refiere al aire que se encuentra en el interior de una mina o de un pozo a cielo abierto. Este entorno contiene una combinación de gases, polvo y partículas procedentes de diversas fuentes, como la respiración, la descomposición de la materia orgánica, los motores de combustión interna, los explosivos y los gases naturales de la mina, como el metano y el sulfuro de hidrógeno. Las operaciones mineras también aportan polvo de roca, como polvo de carbón y sílice, entre otras sustancias. En la atmósfera de la mina influyen factores como la temperatura (que está relacionada con la profundidad, el calor corporal, la maquinaria y las oxidaciones), la humedad y el nivel de contaminación. (HERRERA, 2019)

### 3.2.1.4 Cantidad de aire

El aire que normalmente se respira, conocido como aire seco atmosférico, es una mezcla de gases compuesta principalmente por un 21% de oxígeno y un 78% de nitrógeno en volumen. El gas argón es el que se encuentra presente en una concentración relativamente significativa. (HERRERA, 2019)

## 3.2.2 Parámetros físicos de ventilación

Son medidas y características relacionadas con el flujo de aire y la calidad del aire en un sistema de ventilación. Estos parámetros son importantes para comprender y diseñar sistemas de ventilación eficientes. (HERRERA, 2019)

### 3.2.2.1 Caudal

El caudal es la medida de la cantidad de fluido (como un líquido o un gas) que pasa por un sistema en un tiempo determinado. Denota el volumen o la tasa de transferencia de masa, indicando la cantidad de flujo que se produce. El caudal es un parámetro importante en diversas aplicaciones, como la hidrología, la ingeniería de fluidos, la ventilación, el suministro de agua y muchas otras áreas relacionadas con el flujo de líquidos y gases (HERRERA, 2019).

#### a) Caudal de ingreso y salida



- **Caudal de ingreso ( $Q_i$ )**

La cantidad de aire fresco que se introduce en la mina es crucial para ventilar todas las zonas de trabajo, las labores mineras accesibles, los equipos y la infraestructura minera en general. (SALCANTAY MINING, 2018)

$$Q_i = Q_{i_1} + Q_{i_2} + Q_{i_3} + \dots + Q_{i_n} \quad \text{Ecuación [ 5 ]}$$

- **Caudal de salida ( $Q_s$ )**

Es la cantidad de aire usado que sale de mina.

$$Q_s = Q_{s_1} + Q_{s_2} + Q_{s_3} + \dots + Q_{s_n} \quad \text{Ecuación [ 6 ]}$$

## b) Caudal de demanda y cobertura

- **Caudal de demanda ( $Q_d$ )**

El "caudal de demanda" se refiere a la cantidad de fluido (líquido o gas) requerido por un sistema o proceso en particular de la mina. (SALCANTAY MINING, 2018)

- **Ventilación por Demanda**

Representa una tremenda oportunidad tanto para seguridad de las personas como también reducir costos de energía. (SALCANTAY MINING, 2018)

Asegura un ambiente de trabajo saludable bajo tierra.

-Dilución de sustancias peligrosas.

-Control climático

Evacuación más rápida de los gases de las explosiones. Menor tiempo de inactividad.

- **Cobertura**

Sirve como métrica para evaluar la eficacia de la Gestión de la Ventilación de Minas en relación con la capacidad instalada de infraestructuras y equipos. (SALCANTAY MINING, 2018)

$$C = \frac{Q_i}{Q_d} \times 100 \quad \text{Ecuación [ 7 ]}$$

Donde:

C: Cobertura de demanda de aire en

Q<sub>i</sub>: Caudal de ingreso de aire fresco en cfm

Q<sub>d</sub>: Caudal de demanda de aire de la mina en cfm

c) **Área y perímetro de conducto**

- **Área de conducto**

El área de la sección transversal con techos arqueados, como galerías, rampas y otras labores horizontales, se refiere al área medida del paso o túnel en un plano perpendicular, considerando la forma curva del techo. (SALCANTAY MINING, 2018)

$$A = \frac{11}{12} \times B \times H \quad \text{Ecuación [ 8 ]}$$

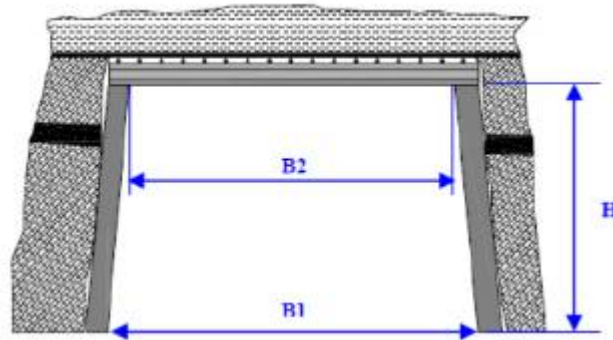
Donde:

A: Área en m<sup>2</sup>.

B: Ancho en m.

H: Altura en m.



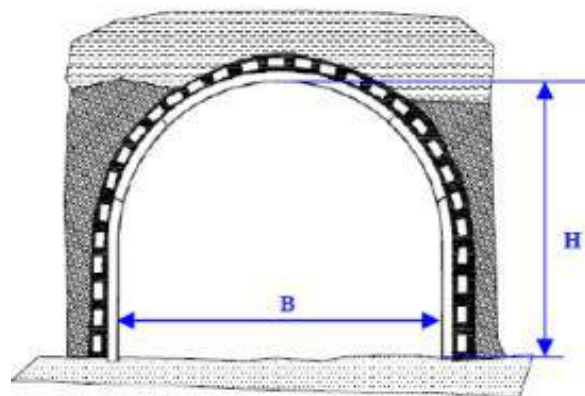


FUENTE: Salcantaymining, s.f., 2018

**Figura 4** Sección de geometría trapezoidal

$$S = \frac{B_1 + B_2}{2} \cdot H$$

Ecuación [ 9 ]



FUENTE: Salcantaymining, s.f. , 2018

**Figura 5** — Sección con arco metálico

$$S = 0.83xBxH$$

Ecuación [ 10 ]

- **Perímetro de conducto**

El perímetro de la sección transversal de las labores mineras con techo arqueado, como galerías, rampas y otras labores horizontales, representa la longitud total del límite o contorno del paso o túnel, teniendo en cuenta la forma curva del techo. (SALCANTAY MINING, 2018)



$$P = B + 1.5H + \frac{1}{2}\sqrt{H^2 + B^2} + \frac{B^2}{2H} \ln \left[ \frac{H}{B} + \frac{1}{B} \right] \sqrt{H^2 + B^2} \quad \text{Ecuación [ 11 ]}$$

Donde: P: perímetro, B: ancho y H: Altura



Figura 6 — Sección del NV 4490

#### d) Factor de fricción

El coeficiente K se determina a partir de tablas que tienen en cuenta las características específicas del trabajo y la densidad estándar del aire. (SALCANTAY MINING, 2018)

$$K = \frac{1}{1.237285 \times 10^7 [1.74 - 2 \times \log(\frac{2xe}{DH})]^2} \quad \text{Ecuación [ 12 ]}$$

Donde:

K: Factor de fricción en lb-min<sup>2</sup>/pie<sup>4</sup>.

e: Espesor de irregularidad.

La aspereza relativa de la vía de aire es: (SALCANTAY MINING, 2018)

$$e = \frac{R_{labor}}{Dh} \quad \text{Ecuación [ 13 ]}$$

R: rugosidad

Dh: Diámetro hidráulico.

**Tabla 3 — Valores estimados del factor de fricción para una densidad de 1.2 kg/m<sup>3</sup>**

Conducto o Tubería	Factor de Fricción K
Galería rectangular sin revestir.	0'012 - 0'016
Galería rectangular sin revestir con mucha entibación.	0'017 - 0'035
Galería rectangular con revestimiento de hormigón proyectado.	0'005 - 0'006
Galería rectangular hormigonada.	0'004
Galerías con cerchas metálicas hormigonadas.	0'004
Galerías con cerchas metálicas y revestimiento de madera.	0'007 - 0'009
Galerías irregulares con cerchas deficientemente alineadas.	0'016
Pozos hormigonados sin fortificaciones ni obstáculos.	0'003 - 0'004
Pozos hormigonados con obstáculos longitudinales (guías, tuberías, etc.).	0'006 – 0'007
Pozos hormigonados con obstáculos transversales.	0'018 – 0'022
Pozos sin revestir.	0'010 - 0'014
Tubería de acero galvanizado.	0'021
Tubería de fibra de vidrio.	0'024
Tubería de plástico flexible (ventilación soplante).	0'0037
Tubería plástico flexible con refuerzo metálico (soplante o aspirante).	0'011
Fuente: (Herbert, 2019)	

#### e) Factor de choque

- Los atascos u obstrucciones en los conductos provocan pérdidas por choque al reducir el área disponible para el flujo de aire. (SALCANTAY MINING, 2018)
- Las pérdidas por choque suelen representar sólo entre el 10% y el 30% de las pérdidas de carga totales de un sistema. (SALCANTAY MINING, 2018)
- Al realizar cálculos precisos, es esencial tener en cuenta las pérdidas por choque, especialmente en los conductos principales o



en las zonas situadas muy cerca del conducto principal donde hay numerosas curvas o cambios en la superficie del conducto.  
(SALCANTAY MINING, 2018)

**f) Longitud equivalente**

El método más eficaz para calcular las pérdidas por choque en la ventilación de minas es el de la longitud equivalente. Al equiparar las pérdidas por fricción a las pérdidas por choque, la longitud equivalente “Le” puede considerarse como la longitud L que representa la longitud equivalente. (SALCANTAY MINING, 2018)

$$L = \frac{3235A}{10^{10}KxP} X \quad \text{Ecuación [ 14 ]}$$

Donde:

L : Longitud equivalente por choque en pie.

A : Área de la sección transversal del conducto en pie<sup>2</sup>.

X : Factor de choque.

K : Factor de fricción en lb-min<sup>2</sup>/pie<sup>4</sup>.

P : Perímetro de la sección transversal del conducto en pie.

**g) Densidad de aire**

Normalmente, se supone que la densidad estándar del aire a nivel del mar es de 1,2 kg/m<sup>3</sup>. Sin embargo, la densidad real del aire a distintas altitudes depende de la presión barométrica y la temperatura del lugar de trabajo. (SALCANTAY MINING, 2018)

$$\rho = \rho_s * e^{\left[\frac{-h}{29.2699T+7995.0852}\right]}$$

Ecuación [ 15 ]

Donde:

$\rho$ : Densidad de aire a “h” m.s.n.m. en lb/pie<sup>3</sup>.

$\rho_s$ : Densidad de aire al nivel del mar = 0,0749 lb/pie<sup>3</sup>.

e: Coeficiente = 2,71828182

h: Altitud en m.

T: Temperatura en °C.



## h) Presión de aire

La caída de presión se produce como resultado de la resistencia encontrada por obstáculos o superficies que dificultan el flujo fluido del aire dentro de las galerías de las minas. La caída de presión por fricción se refiere específicamente a la oposición ejercida por paredes, suelos y techos sobre el movimiento del aire. (SALCANTAY MINING, 2018)

$$P = R \times Q^2 = \frac{K \times P \times (L + L_e) \times Q^2}{5.2 \times A^3} \quad \text{Ecuación [ 16 ]}$$

Donde:

P: Pérdida de presión estática en pulg. de agua.

R: Resistencia del conducto.

K: Factor de fricción en lb-min<sup>2</sup>/pie<sup>4</sup>.

Le: Longitud equivalente en pie.

## i) Resistencia de los circuitos de ventilación

Se refiere a la oposición al flujo de aire que se encuentra en el sistema de ventilación. Es importante comprender y calcular la resistencia para garantizar un flujo de aire adecuado y eficiente en las áreas de trabajo subterráneas (JIMENEZ, 2011)

De acuerdo a la ley de Atkinson:

$$\Delta P = \frac{KCLQ^2}{A^3} = RQ^2$$

$\Delta P$ : Caída de presión por rozamiento (N/m<sup>2</sup>= Pa)

Q: Caudal de aire (m<sup>3</sup>/s)

K: Coeficiente de rozamiento (kg/m<sup>3</sup> o N·s<sup>2</sup>/m<sup>4</sup>)

Despejando la Resistencia de los circuitos de ventilación:

$$R = \frac{KCL}{A^3}$$

R: Resistencia de la conducción (N·s<sup>2</sup>/m<sup>8</sup>)



### 3.2.3 Circuitos de ventilación

En el campo de la ventilación de minas, hay dos formas en que las galerías se combinan para facilitar el flujo de aire en los sistemas de ventilación. Estos dos tipos son:

Flujos en serie a través de galerías interconectadas, en las que el flujo de aire se desplaza secuencialmente de una galería a otra en línea recta.

Flujos paralelos a través de galerías que se ramifican y fusionan, creando una red de pasos interconectados (JIMENEZ, 2011)

Para determinar las características de esta red, como su resistencia total y los volúmenes de flujo de aire, es necesario realizar cálculos que impliquen volúmenes y resistencias. Estos cálculos ayudan a comprender las propiedades estáticas globales de la red y permiten seleccionar un ventilador adecuado para el sistema de ventilación. Para simplificar la red y determinar un único valor de resistencia a vencer, es necesario convertir los circuitos paralelos en un único circuito en línea. Esta conversión nos permite calcular la resistencia global que hay que vencer (JIMENEZ, 2011).

#### 3.2.3.1 Cálculos de redes

El escenario más común en la ventilación de minas implica la presencia de redes de ventilación interconectadas que combinan circuitos en paralelo y en serie. Esto ocurre cuando volúmenes específicos de aire tienen que fluir por galerías o ramales designados, y las características de cada una de estas galerías o ramales, como sus propiedades estáticas, ya se han determinado. En estos casos, el objetivo es calcular las propiedades estáticas globales de todo el circuito, junto con el volumen total de aire que circula por él. En este escenario, cualquier red paralela, ya sea simple o compleja, puede resolverse utilizando métodos algebraicos para regular las propiedades estáticas dentro de las ramas. Esta regulación se consigue instalando puertas o ventanas que controlen el flujo de aire en los volúmenes asignados a cada galería. Los volúmenes asignados a cada galería deben indicarse claramente en el esquema del circuito de ventilación. Es importante tener en cuenta que, en

las redes paralelas, las propiedades estáticas deben ser iguales. El diagrama también debe ilustrar la dirección del flujo de cada rama, como galerías, chimeneas o chimeneas, junto con sus volúmenes respectivos y las propiedades estáticas calculadas asociadas a cada galería. Esta información es crucial para determinar la potencia del motor necesaria para el funcionamiento del ventilador principal (JIMENEZ, 2011).

#### a) Conexión en serie

Este circuito presenta las siguientes relaciones:

1. El volumen total permanece constante a lo largo de todo el circuito, desde que el aire entra en el conducto hasta que sale de él. (JIMENEZ, 2011)

$$Q_t = Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_4 = \dots \quad \text{Ecuación [ 17 ]}$$

2. La resistencia total del circuito se determina sumando las pérdidas o resistencias encontradas: (JIMENEZ, 2011)

$$H_t = H_f1 + H_f2 + H_f3 + H_f4 \quad \text{Ecuación [ 18 ]}$$

3. Podemos expresar la relación entre HT (resistencia total) y el volumen  $Q_t$  (volumen de flujo) como  $RQ^2$ . Por lo tanto, podemos concluir que:

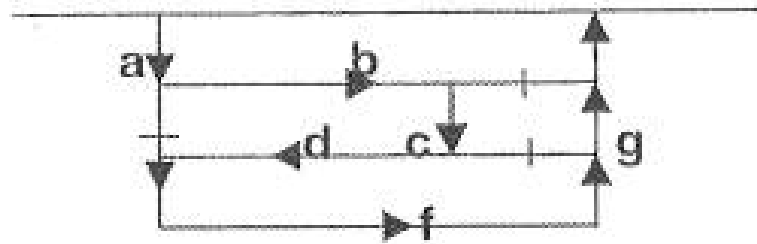
$$H_f = RQ^2 = R_1Q^2_1 = R_2Q^2_2 = R_3Q^2_3; = Q^2(R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \dots) \quad \text{Ecuación [ 19 ]}$$

4. Como todos los volúmenes son iguales:

$$R_t = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \dots \quad \text{Ecuación [ 20 ]}$$

5. En los circuitos en serie, las demandas de potencia son elevadas para un volumen de aire dado, ya que la potencia necesaria para vencer el peso del aire se acumula a lo largo del circuito. (JIMENEZ, 2011)





FUENTE: Jimenez, 2011.

### Figura 7 Circuitos en serie

Los datos calculados y analizados nos ayudan a identificar la sección más resistente dentro de la mina que requiere inspección para su mejora. Al identificar esta sección, podemos centrarnos en encontrar formas de reducir su resistencia y mejorar su eficiencia (JIMENEZ, 2011).

#### b) Conexión en paralelo

Cuando el volumen total de flujo de aire se divide o distribuye entre varias galerías en la ventilación de minas, se denomina circuito paralelo. Cada rama del circuito paralelo se conoce como división.

1. Cuando el flujo de aire circula por galerías paralelas o ramales que se bifurcan, el volumen total (Q) es igual a la suma de los volúmenes que pasan por cada rama. (JIMENEZ, 2011)

$$Q_t = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \dots (A) \quad \text{Ecuación [ 21 ]}$$

2. La pérdida de resistencia es uniforme en todas las ramas del circuito paralelo.

$$H_f = H_{f1} = H_{f2} = H_{f3} = H_{f4} = \dots \quad \text{Ecuación [ 22 ]}$$

3. Entendiendo que  $H = RQ$ , podemos deducir que la resistencia total ( $H_f$ ) se puede determinar conociendo el área (A) y el volumen de flujo (Q), sin utilizar explícitamente la fórmula de la resistencia. (JIMENEZ, 2011) En resumen:



$$Q = \sqrt{\frac{H_{f1}}{R_L}} \quad \text{Ecuación [ 23 ]}$$

4. La resistividad o resistencia (R) está influida por las características específicas de cada galería, y podemos determinar las resistencias de galerías individuales utilizando los datos recogidos durante las actividades de cartografía sobre el terreno. (JIMENEZ, 2011)

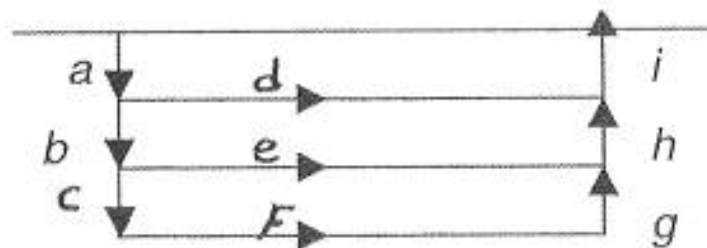
$$\text{Si } Q = \sqrt{\frac{H_f}{R}} \text{ y } Q_1 = \sqrt{\frac{H_{f1}}{R_1}} \text{ donde: } H_{f2} = H_{f1} = H_{f2} \dots \quad \text{Ecuación [ 24 ]}$$

$$Q_1 = Q \frac{\frac{1}{\sqrt{R_1}}}{\frac{1}{\sqrt{R}}} = Q \sqrt{\frac{R}{R_1}} \text{ y } Q_2 = Q \frac{\frac{1}{\sqrt{R_2}}}{\frac{1}{\sqrt{R}}} = Q \sqrt{\frac{R}{R_2}} \quad \text{Ecuación [ 25 ]}$$

Esta relación establece que si tenemos conocimiento de la resistividad (R) de las galerías, así como del volumen deseado (Q) a distribuir, podemos determinar los volúmenes específicos (Q1 y Q2) que pasarán por cada ramal. (JIMENEZ, 2011)

$$R = \frac{K.P(L+L_e)}{5.2 A^3} \quad \text{Ecuación [ 26 ]}$$

5. En mina un circuito en paralelo tiene el siguiente esquema:



FUENTE: Jiménez, 2019.

**Figura 8 — Circuito en paralelo**



### 3.2.4 Ventiladores en minería subterránea

El término "aire" o "atmósfera de la mina" se refiere a la combinación de gases presentes en los pozos o trabajos de la mina. La gestión de la atmósfera en las minas subterráneas es de suma importancia, ya que influye en varios aspectos, entre ellos (JIMENEZ, 2011).

- Productividad de la mina: Crear unas condiciones atmosféricas confortables para el trabajo humano puede mejorar la productividad de la mina. Cuando los mineros disponen de un entorno de trabajo adecuado, pueden realizar sus tareas con mayor eficacia. (HERRERA, 2019)
- Seguridad de las operaciones: Mantener el control sobre la atmósfera de la mina es crucial para garantizar la seguridad de toda la operación minera. Controlar los gases y polvos tóxicos o explosivos reduce el riesgo de accidentes y posibles explosiones, salvaguardando así a los trabajadores y a la propia mina. (HERRERA, 2019)

#### 3.2.4.1 Clasificación de ventiladores

Según su forma constructiva: Los ventiladores pueden clasificarse en horizontales o verticales, dependiendo de su construcción. Mientras que los ventiladores horizontales se utilizan habitualmente, los verticales se recomiendan para aplicaciones específicas. En minería profunda y en situaciones que requieren caudales elevados, se prefieren los ventiladores verticales. Al utilizar una configuración de ventilador vertical, pueden evitarse estos problemas, lo que conduce a operaciones de ventilación más eficientes y racionalizadas. (HERRERA, 2019)

Según el tipo de accionamiento: Los ventiladores pueden clasificarse en horizontales o verticales en función de su diseño. Esta redirección suele provocar pérdidas de carga considerables y requiere un consumo de energía adicional. Optar por una configuración de ventilador vertical mitiga estos problemas, lo que se traduce en procesos de ventilación más eficaces y eficientes. (HERRERA, 2019)

En función del número de etapas o escalones: Aunque la mayoría de las aplicaciones suelen utilizar una sola etapa, el uso de un ventilador de una



sola etapa no es factible para aplicaciones que requieren presiones muy altas, superiores a 5000 Pa. En tales situaciones, se emplean ventiladores de dos etapas, ya que tienen la capacidad de alcanzar niveles de presión más elevados. (HERRERA, 2019)

### 3.2.4.2 Selección de ventiladores

Los ventiladores son máquinas que crean un aumento de presión para facilitar el movimiento del aire a través de un circuito, compensando las pérdidas producidas en el sistema. Además, existen otras máquinas diseñadas para elevar la presión del aire, que reciben distintos nombres en función de su rango de presión de trabajo y su campo de aplicación. (HERRERA, 2019)



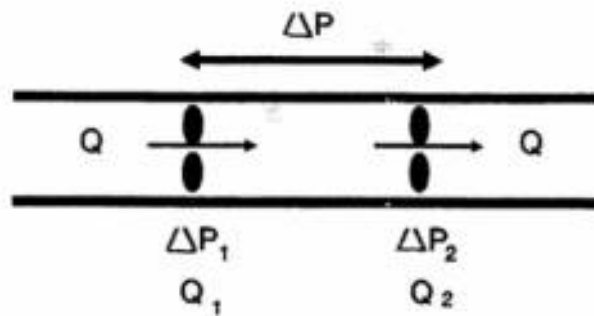
**Figura 9 — Sistema de ventilación en la U.O. Pampamarquino**

### 3.2.4.3 Acoplamiento de ventiladores

Dentro de un sistema de ventilación, pueden instalarse varios ventiladores en distintos puntos del circuito. (HERRERA, 2019)

#### a) Acoplamiento en serie

Este fenómeno se produce cuando se colocan varios ventiladores adyacentes, ya sea cerca o a distancia, dentro de la misma rama del sistema de ventilación. En este caso, las presiones aportadas por cada ventilador se combinan, mientras que todos los ventiladores funcionan con el mismo caudal. (HERRERA, 2019)

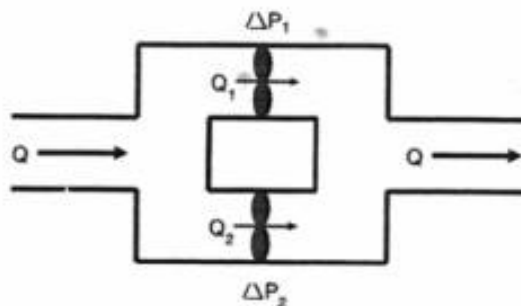


FUENTE: Herrera, 2019.

**Figura 10** — Acoplamiento de aire

**b) Acoplamiento en paralelo**

En este escenario, los ventiladores están situados en ramas separadas, pero su proximidad es tal que las pérdidas de presión por fricción entre los extremos de la bifurcación pueden considerarse despreciables. (HERRERA, 2019)



FUENTE: Herrera, 2019.

**Figura 11** — Acoplamiento en paralelo



### 3.2.5 Cálculo del requerimiento de aire

#### 3.2.5.1 Cuando en la operación se utilice equipos con motor petrolero:

Según el artículo 252 d) del reglamento, el cálculo de la demanda de aire dentro de la mina: (REGLAMENTO DE SEGURIDAD Y SALUD OCUPACIONAL DE MINERÍA, 2016)

$$Q_{T0} = Q_{T1} + Q_{Fu} \quad \text{Ecuación [ 27 ]}$$

Donde:

Q To = Caudal total para la operación

QT1 = La sumatoria de caudal requerido

##### a) Caudal requerido por el número de trabajadores (Q Tr )

$$Q_{Tr} = F \times N (m^3/min) \quad \text{Ecuación [ 28 ]}$$

Donde:

Q Tr = Caudal total para “n” trabajadores (m<sup>3</sup>/min);

F = Caudal mínimo por persona

N = Número de trabajadores.

##### b) Caudal requerido por el consumo de madera (Q Ma )

$$Q_{Ma} = T \times u (m^3/min) \quad \text{Ecuación [ 29 ]}$$

Donde:

Q Ma = Caudal requerido por toneladas de producción (m<sup>3</sup> /min)

u = Factor de producción (REGLAMENTO DE SEGURIDAD Y SALUD OCUPACIONAL DE MINERÍA, 2016)

T = Producción en toneladas métricas húmedas por guardia.



c) **Caudal requerido por temperatura en las labores de trabajo (Q<sub>Te</sub>)**

$$Q_{T0} = V_m \times A \times N \text{ (m}^3/\text{min)} \quad \text{Ecuación [ 30 ]}$$

Donde:

Q<sub>Te</sub> = Caudal por temperatura (m<sup>3</sup>/min);

V<sub>m</sub> = Velocidad mínima;

N = Número de niveles (REGLAMENTO DE SEGURIDAD Y SALUD OCUPACIONAL DE MINERÍA, 2016)

d) **Caudal requerido por equipo con motor Petrolero (Q<sub>Eq</sub>)**

$$Q_{Eq} = 3 \times HP \times D_m \times F_u \text{ (m}^3/\text{min)} \quad \text{Ecuación [ 31 ]}$$

Donde:

Q<sub>Eq</sub> = Volumen de aire necesario para la ventilación (m<sup>3</sup>/min);

HP = Capacidad efectiva de potencia (HPs);

D<sub>m</sub> = Disponibilidad mecánica promedio de los equipos (%);

F<sub>u</sub> = Factor de utilización promedio de los equipos (%).

(REGLAMENTO DE SEGURIDAD Y SALUD OCUPACIONAL DE MINERÍA, 2016)

e) **Caudal requerido por fugas (Q<sub>Fu</sub>)**

$$Q_{Fu} = 15\% \times Q_{T1} \text{ (m}^3/\text{min)} \quad \text{Ecuación [ 32 ]}$$

**3.2.5.2 Cuando en la operación no se utilicen equipos con motor petrolero:**

$$Q_{T0} = Q_{T1} + Q_{Fu} \quad \text{Ecuación [ 33 ]}$$

Q<sub>Fu</sub> = 15% del Q<sub>T1</sub> (REGLAMENTO DE SEGURIDAD Y SALUD OCUPACIONAL DE MINERÍA, 2016)



a) Caudal requerido por el número de trabajadores (Q Tr )

$$Q_{Tr} = FxN(m^3/min) \quad \text{Ecuación [ 34 ]}$$

F = Caudal mínimo por persona

b) Caudal requerido por el consumo de madera (Q Ma )

$$Q_{Ma} = Txu(m^3/min) \quad \text{Ecuación [ 35 ]}$$

Donde:

Q Ma = Caudal requerido por toneladas de producción (m<sup>3</sup>/min)

u = Factor de producción

T = Producción en toneladas métricas húmedas por guardia.

(REGLAMENTO DE SEGURIDAD Y SALUD OCUPACIONAL DE MINERÍA, 2016)

c) Caudal requerido por temperatura en las labores de trabajo (Q Te)

$$Q_{Te} = V_mxAxN(m^3/min) \quad \text{Ecuación [ 36 ]}$$

Donde:

Q Te = Caudal por temperatura (m<sup>3</sup>/min);

V m = Velocidad mínima;

d) Caudal requerido por fugas (Q Fu )

$$Q_{Fu} = 15\%xQ_{t1}(m^3/min) \quad \text{Ecuación [ 37 ]}$$

e) Caudal requerido por consumo de explosivo (Q Ex)

$$Q_{Ex} = AxVxN(m^3/min) \quad \text{Ecuación [ 38 ]}$$

Donde:



$Q_{Ex}$  = Caudal de aire requerido por consumo de explosivo detonado  
(m<sup>3</sup> /min)

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

### 3.2.6 Decrecimiento de presión atmosférica con la altitud

La fuerza de atracción gravitacional influye en la superficie terrestre provocando que el peso del aire ejerza una presión sobre la superficie. La presión atmosférica se expresa en diferentes equivalencias descrito en el sistema de unidades de medida las cuales son:

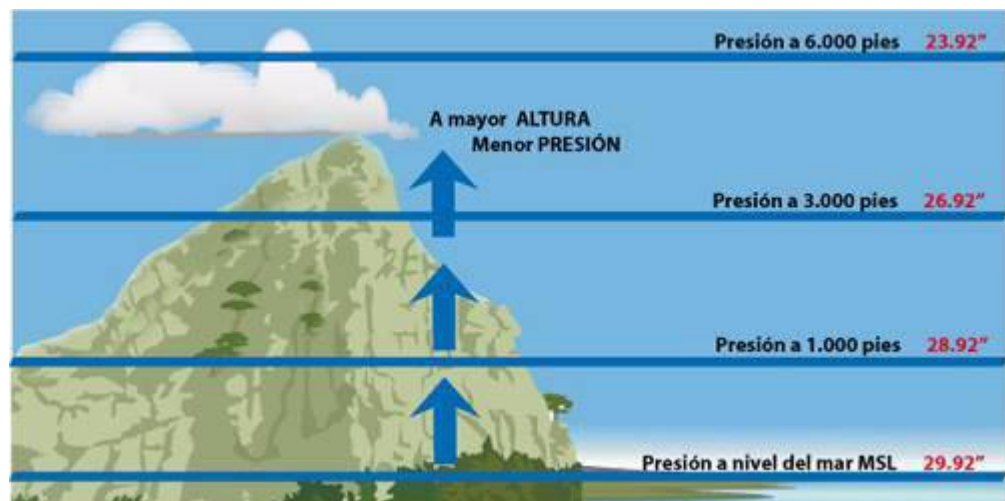
1 *Atm*

1,013 *Bar*

101,325 *kPa*

760 *mm de Hg*

760 *Torr*



FUENTE: Hacemos Cumbre, 2016.

**Figura 12 — Presión atmosférica a altitud diferente**

La ecuación que describe la conducta de la presión atmosférica es:

$$P = P_0 * e^{-\frac{g \cdot \Delta h}{R \cdot T}} \quad \text{Ecuación [ 39 ]}$$

Donde:



$P_0 =$  Presión atmosférica estándar [Pa]

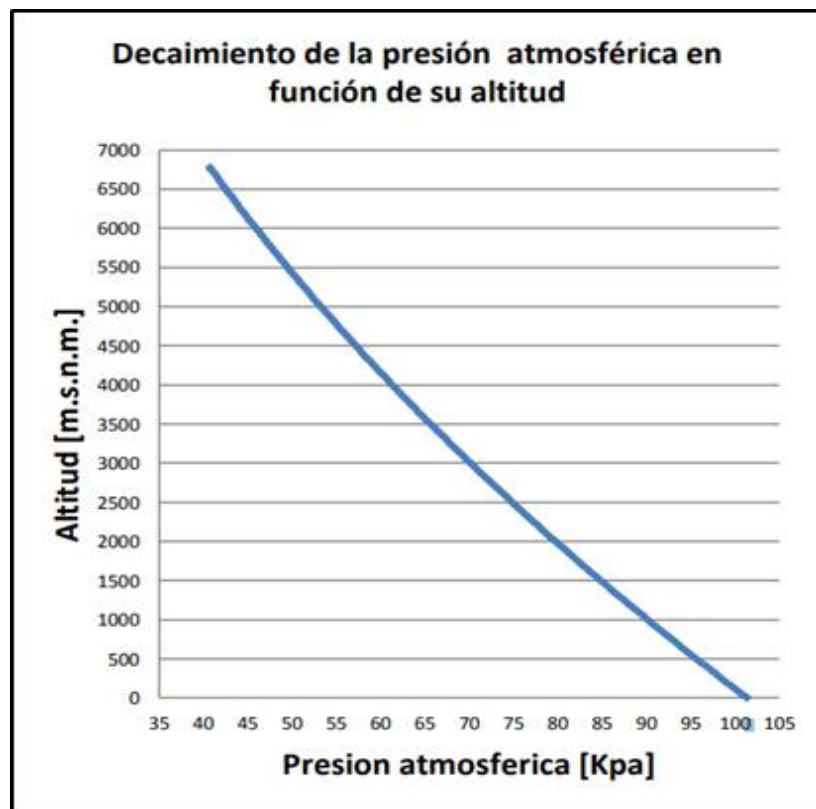
$e =$  Base de los neperianos.

$g =$  Constante gravitacional  $\left[ \frac{m}{seg^2} \right]$

$\Delta h =$  Altura donde se desea calcular la presión [m]

$R =$  Constante del aire atmosférico  $\left[ \frac{J}{Kg^{\circ}K} \right]$

La presión decrece exponencialmente cuando la altura aumenta, por ello se puede decir que habrá menos presión atmosférica según este a mayor altitud sobre el nivel del mar. (CAXI, 2017)



FUENTE: Citado por CAXI, 2017

**Figura 13 — Presión atmosférica vs Altitud**

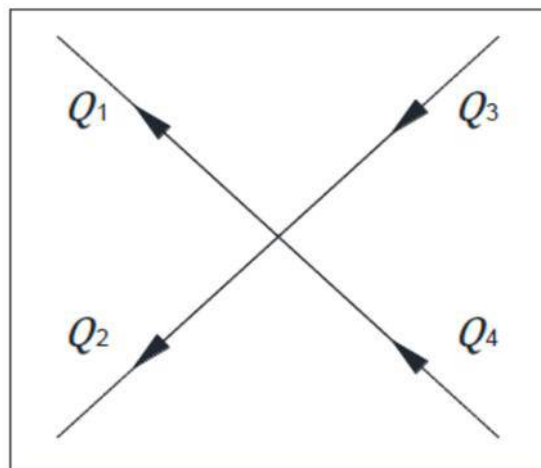


### 3.2.7 Parámetros de cálculo utilizados en ventilación

#### 3.2.7.1 Leyes de Kirchhoff

Gustav Robert Kirchhoff estableció leyes que se utilizan en el caso de circuitos eléctricos, dentro de ellos puede emplearse para casos de circuitos de ventilación en minas en la que los caudales de aire y las caídas de presión tienen correspondencia con la corriente y el voltaje proporcionalmente.

**Primera Ley de Kirchhoff o denominado ley de continuidad.** - Indica que la suma algebraica de los flujos de aire en cualquier nodo es igual a cero, lo que quiere decir que al sumar las diferentes cantidades de aire salientes del nodo y las que fluyen en dirección de la unión deben ser iguales.



FUENTE: Área ventilación de la mina SOTRAMI S.A.

**Figura 14 — Representación de la primera ley de Kirchhoff**

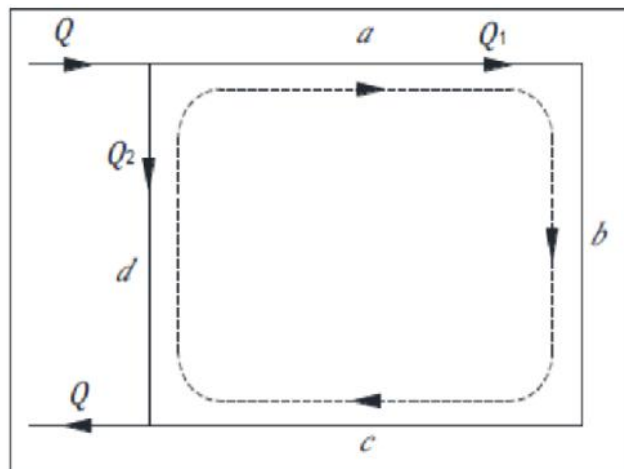
$$\sum Q = 0$$

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4 \quad \text{Ecuación [ 40 ]}$$

**Segunda ley de Kirchhoff o denominada ley de circulación.** – de manera semejante señala que al sumar algebraicamente las caídas de presión de los ramales que conforman una malla es igual a cero y en situaciones de una



ventilación minera se debe considerar la presencia de presión por ventiladores (Pf) que se encuentran posicionados en alguna malla, también la presión por ventilación natural (Pvn)



FUENTE: Área ventilación de la mina SOTRAMI S.A.

**Figura 15 — Representación de la segunda ley de Kirchhoff**

$$\sum P = 0$$

$$P_T = P_a + P_b + P_c - P_d = 0 \quad \text{Ecuación [ 41 ]}$$

### 3.2.7.2 Método de Hardy Cross

Es la técnica que tiene mayor difusión, la cual es iterativa que tiene en consideración a Q como flujo de aire que se traslada por medio de un conducto de resistencia denominado R que se expresa en la ecuación:

$$P = RQ^2 \quad \text{Ecuación [ 42 ]}$$

Donde:

$P = \text{Presión (Pa)}$

$R = \text{Resistencia } \left( \frac{Ns^2}{m^8} \right)$



$$Q = \text{Cantidad de aire} \left( \frac{m^3}{s} \right)$$

Luego para hallar el valor original del flujo representado por  $Q$ , se estima un valor de inicio  $Q_a$ :

$$Q = Q_a + \Delta Q \quad \text{Ecuación [ 43 ]}$$

En la ecuación delta  $Q$  representa el error que existe en  $Q_a$  inicial adjudicado, se debe hallar el valor delta  $Q$  a ser aplicado en el valor de inicio  $Q_a$  asumido. En el caso de representar realmente los conductos de aire de una minera, no están separados, por el contrario, se encuentran conjugados a una red de conductos donde su magnitud depende de la prolongación de la red. (CAXI, 2017)

### 3.2.7.3 Circuitos de ventilación

En el caso de ventilación de mineras se encuentran dos tipos de conjugación de galerías por donde fluye dos flujos de sistema de ventilación, estos están en serie a lo largo de galerías en línea, y paralelos en el caso de galerías en cruces hacia paralelo, se ensamblan ambas una después de la que le sigue dando forma de red, su cálculo se debe dar en volumen y resistencia a fin de elegir un ventilador conveniente. Con ello se interpreta la formación de red con circuitos en paralelo que deben transformarse en serie para que este sea de una sola línea y proporcione datos de la resistencia a vencer. (CAXI, 2017)

**Circuitos en serie.** – En este el volumen del aire total es semejante en todo el circuito desde el ingreso de la mina a su salida:  $Q_T = Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_4 \dots$  y la resistencia total equivale a la suma de pérdidas de las galerías individualmente por donde transita el flujo siendo así:  $P_T = P_1 + P_2 + P_3 +$

$P_4 + \dots$  luego, la correspondencia entre PT y volumen QT son iguales:  $P_T = RQ^2$

**Circuitos en paralelo.** – se da en el momento que el volumen del aire se reparte en diversas galerías, el término utilizado en minas es Splitting

### 3.2.8 Presiones de una mina

La magnitud de presión artificial se determina al sumar algebraicamente las presiones que componen los partes de un circuito y hacer un balance de ellas para todos los circuitos que conforman una red ventilación, luego a esta presión se le llama presión total de una minera que se expresa:  $P_t(\text{mina}) = P_s(\text{mina}) + P_v(\text{mina})$

### 3.2.9 Marco normativo nacional

En la C.P.P. Constitución Política del Perú, los artículos 7, 9 y 59, se define el Derecho de proteger la salud, la familia e la comunidad que contiene componentes de obligación por parte del Estado para velar por la salud y cuidado del empleador como del trabajador para tener en prevención y solucionar problemas. En el inciso B se plasma la Ley General de la Salud capítulo séptimo que habla sobre la higiene y seguridad que debe existir en todo medio de trabajo.

Así mismo en el artículo 100 se dicta que quienes tienen a su cargo la administración de actividades extractivas de producción deben asegurar un ambiente laboral con seguridad para trabajadores y personas no participantes. Continúa expresando el artículo 101 que la higiene y seguridad de los lugares de extracción se rigen a las condiciones que dictamine las autoridades de salud a cargo para designar una normativa y atención del pleno cumplimiento.

En el Código Civil artículo 1970 establece que quien cause daños o perjuicios estando a cargo de una actividad de riesgo o peligro tiene la obligación de remediarlo.

El Código Penal indica que, si una persona obliga a otra con actos violentos o amenazas para laborar sin circunstancias seguras de higiene industrial que se establecen por la autoridad, cometen delito de violación a la libertad de trabajo.

En la ventilación, se reglamenta en el artículo 246 que el encargado o titular de una actividad minera debe velar por la provisión de aire limpio según sea necesario para los trabajadores en los equipos para la salida de gas, humo, polvo que podría originar



daños a la salud, para ello la red de ventilación debe estar al margen de los límites de exposición ocupacional para sustancias químicas del Anexo 15 en el reglamento aprobado por el D.S. N° 015 2005-SA.

### **3.2.10 Técnicas para medir la presión y caudal de la corriente de aire**

#### **3.2.10.1 Medición de presión en ventilación de minas**

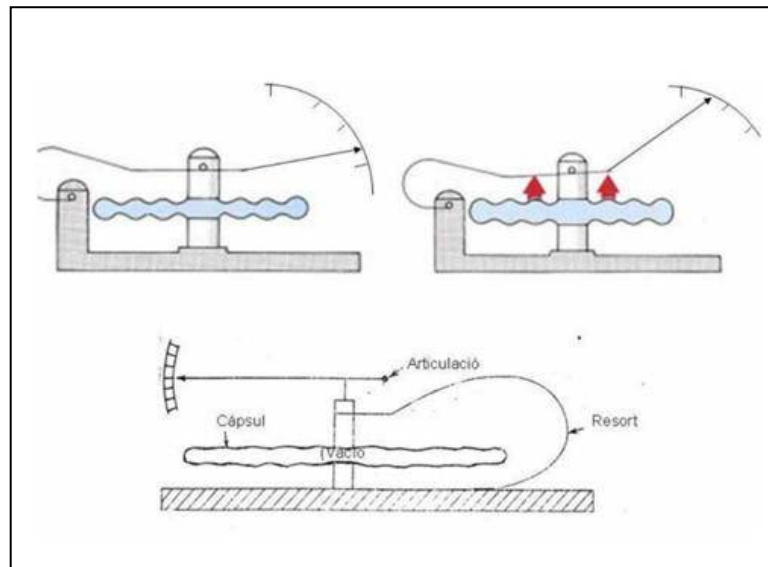
En ventilación de minas, la medida de presión se dirige a determinar la variación de presión de dos puntos de un círculo. Se realiza directamente cuando los puntos no se encuentran muy aislados con el uso de un manómetro o indirectamente se mide la presión absoluta en cada punto de forma individual.

##### **a) Instrumentos de medición de presión absoluta.**

Para la presión absoluta se necesita del barómetro

Barómetro de mercurio tiene mayor precisión en su medición, sin embargo, es más frágil en el transporte durante su uso en una determinada minera, además que debe ensamblarse verticalmente de forma perfecta y se debe corregir la temperatura en caso de dilatación o contracción debido al calor o frío.

El barómetro aneroide mide altitud y a su vez presión absoluta. Se compone de una capsula metálica, cuando la presión en el exterior aumenta o disminuye, el instrumento se contrae o expande, su calibración debe realizarse periódicamente y de igual forma la corrección de temperatura.



FUENTE: HERRERA, 2019

**Figura 16 — Barómetro aneroide**

**b) Instrumentos de medición de presión manométrica. -**

Manómetro diferencial, su depósito tiene forma de u con material de vidrio, en su interior tiene líquido de color, el contraste de altura que hay entre ramas mide la variación de presión de los puntos en los que se ha conectado.

El magnehelic es otro manómetro que ejerce cambio de presión a través de la deformación encima de una membrana en el gas, por un campo magnético.

**c) Levantamientos depresiométricos**

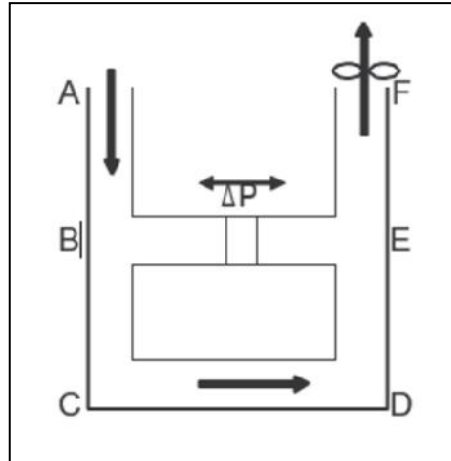
Se utilizan para hallar de forma experimental el coeficiente de fricción en una determinada área de mina, su cálculo se realiza con la fórmula establecida por Atkinson:

$$R = \frac{\Delta P}{Q^2}$$

$$K = \frac{A^3 * \Delta P}{L * C * Q^2}$$



**Medida de diferencia de presión a ambos lados de una compuerta estanca.** Suponiendo que en un circuito de ventilación conformado por dos galerías ABC y DEF y niveles BE y CD con una compuerta y un ventilador en la salida.



FUENTE: HERRERA, 2019

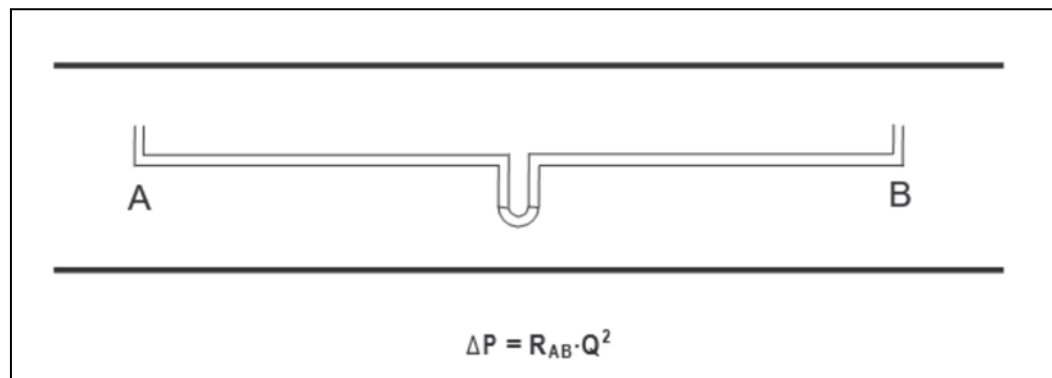
**Figura 17 — Diferencia de presión a ambos lados de una compuerta estanca**

Puede medirse con manómetro en U la diferencia de presión existente en ambos lados de la compuerta y calcularse el valor de coeficiente de fricción del tramo BCDE en el circuito.

### **Medida de diferencia de presión entre dos puntos**

Si ambos puntos están ubicados en una misma cota con distancia corta menor a 300m se puede usar un manómetro de U, si los puntos están separados con distinta cota, se debe tener en cuenta la auto compresión del área por su propio peso.





FUENTE: HERRERA 2019

**Figura 18 — Diferencia de presión entre dos puntos**

### 3.2.11 Polvo en el cuerpo humano

Los pulmones son órganos por los que se introducen oxígeno al cuerpo para una actividad metabólica necesaria y adecuada. a través de inhalación y exhalación de forma iterativa es que el aire se acerca mejor a los flujos de sangre cuando ambos están separados por una membrana delgada de aproximadamente 0.5 micrones de espesor. El oxígeno va directo de la membrana del aire hacia la sangre mientras que el dióxido de carbono se difunde hacia otra dirección. el sistema respiratorio se encuentra equipado de mecanismos de defensa contra los contaminantes como el aerosol que existe en el aire. Sin embargo, los mecanismos se pueden eliminar por agentes que causan cáncer además cuando se está expuesto a concentraciones elevadas de polvo el sistema que defiende el cuerpo puede tener sobrecarga y permitir que los pulmones no tengan un trabajo eficiente cuando intercambia gases y se vuelve más vulnerable a tener infecciones bronquiales o pulmonares.

### 3.2.12 Control de polvo en minas

Las emisiones iniciales que afectan la gravedad de los problemas de polvo se evalúan cuando las etapas de diseño y planificación de explotación minera en cualquier depósito geológico los métodos de trabajo con la tasa de producción de minerales y el equipo tienen incidencia en el polvo que se genera y es transportado por el aire. la mina tiene un diseño en el tamaño y cantidad de las



vías respiratorias y cómo es la eficiencia en el sistema de ventilación en una velocidad en la que los contaminantes del aire incluyendo el polvo se diluyen y eliminan de la minera.

Para que la mina existente hay cuatro métodos que se puede usar para controlar la producción de polvos en suspensión ya que son peligrosos. Cuando se utiliza una gestión buena de limpieza en las minas se ayuda grandemente a que se tenga el control del polvo ya que este es un problema las medidas tienen esquemas de mantenimiento que están planificados para los equipos y la ventilación, así como limpieza de derrames escombros de rocas y acumulaciones de polvos locales y una supervisión adecuada de prácticas laborales. (KARAGIANNI ET AL., 2021)

### 3.2.13 Leyes de los gases ideales

#### 3.2.13.1 Ley de Boyle

Es la analogía entre el volumen y la presión de la cantidad de gas con T cte, estas tienen una relación inversamente proporcional

$$P_1 * V_1 = P_2 * V_2 \quad \text{Ecuación [ 44 ]}$$

Donde:

$$V_1 \text{ y } V_2 = \text{volumen en } m^3$$

$$P_1 \text{ y } P_2 = \text{Presión en Pa}$$

#### 3.2.13.2 Ley de Charles

Es la correspondencia entre el volumen y la temperatura aplicado a gases ideales, su presión se mantiene constante y V y T son directamente proporcionales



$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad \text{Ecuación [ 45 ]}$$

Donde:

$V_1$  y  $V_2 = \text{volumen en } m^3$

$T_1$  y  $T_2 = \text{temperatura en } K$

### 3.2.13.3 Ley de Gay Lussac

Su relación esta entre la presión y temperatura a cierta cantidad de gas ideal con volumen cte., en este caso V es cte. y directamente proporcional con T

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \quad \text{Ecuación [ 46 ]}$$

Donde:

$P_1$  y  $P_2 = \text{Presion en } Pa$

$T_1$  y  $T_2 = \text{temperatura en } K$

### 3.2.14 Principio de Bernoulli y el cambio de energía de un fluido.

Bernoulli en su ecuación relaciona a la presión, energía cinética y potencial en un plano referencial en un fluido laminar que es constante en densidad, esta ecuación se expresa:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho * V_1^2 + \rho * g * Z_1 = k = P_2 + \frac{1}{2}\rho * V_2^2 + \rho * g * Z_2 \quad \text{Ecuación [ 47 ]}$$

Donde:

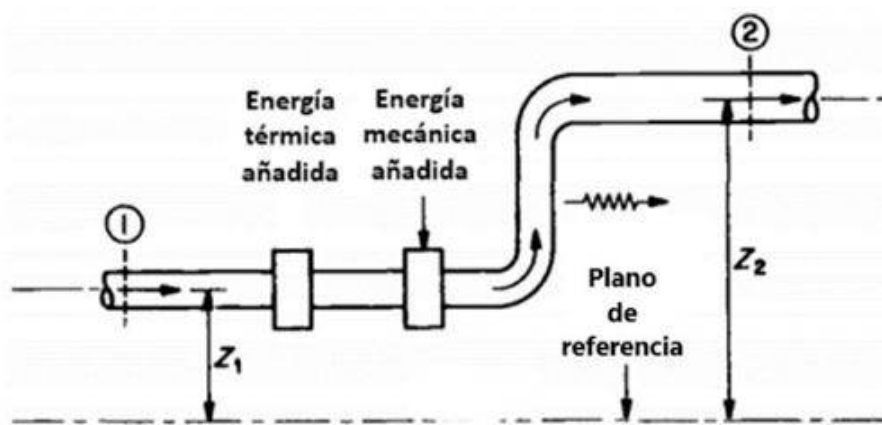


$P_1$  y  $P_2 =$  Presion

$V_1$  y  $V_2 =$  velocidad

$Z_1$  y  $Z_2 =$  Altura del fluido

En la representación gráfica se observa como el fluido se dirige de izquierda a derecha en una tubería que varía en su altura y área, esta representación se puede extrapolar en un sistema de ventilación de minería que es estacionario en su proceso.



Fuente: RIVERA, 2020

**Figura 19 — Flujo de un fluido mostrando relaciones de energía**

Si se involucran transiciones y pérdidas de energía  $k$  debe sumar todas esas pérdidas en su recorrido y la ecuación sería:

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho * V_1^2 + \rho * g * Z_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho * V_2^2 + \rho * g * Z_2 = H_i$$

Donde:

$\rho$  es la densidad del fluido [ $kg * m^{-3}$ ]

$g$  es la aceleración de gravedad [ $m * s^2$ ]

$P$  es la presión [ $Pa$ ]

$V$  es la velocidad del fluido [ $m * s^{-1}$ ]



$Z$  es la altura del fluido con respecto al plano de referencia [m]

$\frac{1}{2} \rho \cdot V^2$  es energía cinética [Pa]

$\rho \cdot g \cdot Z$  es energía potencial [Pa]

$H_i$  son las pérdidas de energía del flujo [Pa]

### 3.2.15 Software VentSim™ Design

La recolección de datos en un determinado terreno se puede llevar a cabo con el uso de un multímetro digital modelo AMF035 que determina los valores de velocidad de aire en los pozos. (RIVERA, 2020)



FUENTE: RIVERA, 2020

#### Figura 20 — Multímetro AMF035 y detector multi gas MSA Alt air 4X

Para el cálculo de caudales se debe tener la medida de las dimensiones geométricas de los pozos o ductos y las velocidades del aire que pasa por estos lugares, para ello se constituyen puntos de inspección de áreas de la mina donde se encuentren esas velocidades que serán de apoyo para la calibración del modelo de simulado.

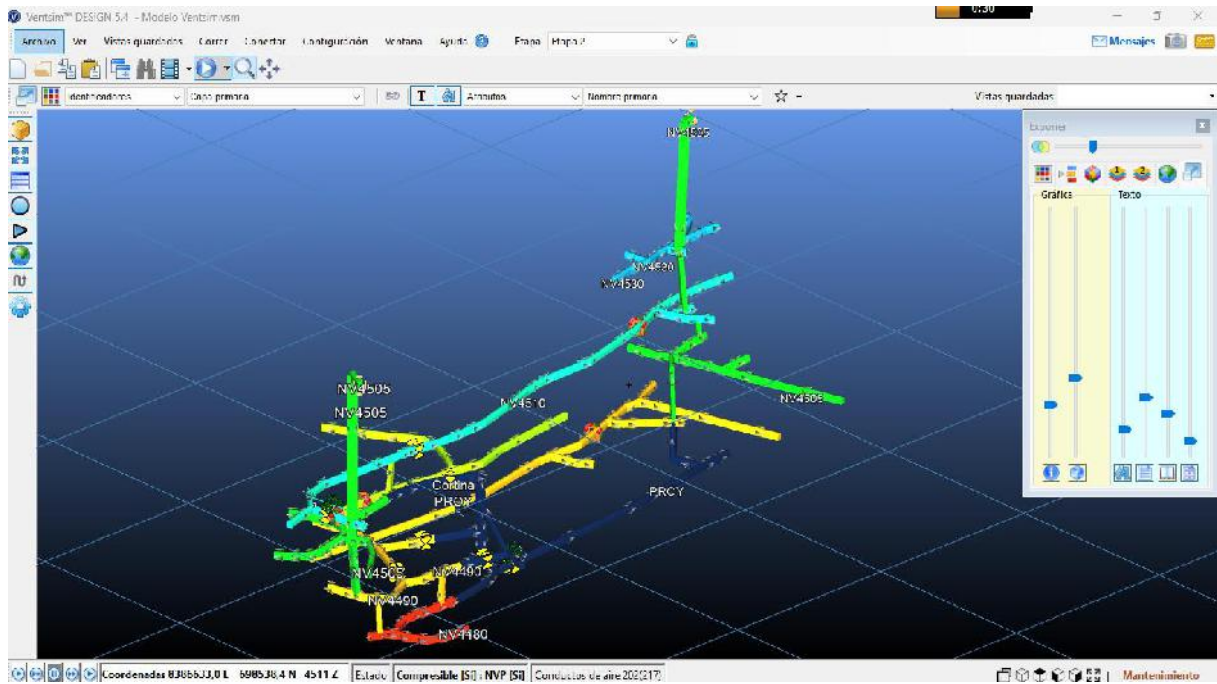


Figura 21 — Vista del software con el modelo tridimensional de las labores

### 3.3 Marco conceptual

- a) **CAPEX (Capital Expenditure o Gasto de Capital)** El CAPEX se refiere a las inversiones a largo plazo que una empresa minera realiza para adquirir, mejorar o expandir sus activos físicos. En términos más simples, es el dinero que se invierte para construir o mejorar la mina.
- b) **Cobertura de Aire.** - es un indicador clave de la eficiencia y seguridad de un sistema de ventilación en una mina. Una buena cobertura de aire garantiza que los trabajadores dispongan de un ambiente de trabajo seguro y saludable, lo que a su vez contribuye a mejorar la productividad y la rentabilidad de la operación minera.
- c) **Ducto de ventilación.** Estos se clasifican en tres tipos siendo estos los de tipo metálicos, plásticos flexibles lisos y los plásticos reforzados. El primer mencionado presenta materiales de hierro y dependerá de su diámetro para ser utilizado, asimismo, es de un coeficiente de fricción reducido, presenta uniones altamente herméticas y un costo de mantenimiento económico. Referente a los lisos, debido a su menor peso y mayor flexibilidad, es decir su simplicidad son lo más usados. En cuanto a los reforzados son utilizados para la extracción del aire y sistemas de impulsión. (SEARS ET AL., 2009)



- d) **Eficiencia de ventilación.** Para una correcta ventilación dentro de una mina, deben operar tres sistemas de ventilación, siendo estos los primarios, secundarios y auxiliares.
- e) **Evaluación económica.** - La evaluación económica de un proyecto, ya sea en el sector minero o en cualquier otra industria, es un proceso fundamental para determinar su viabilidad financiera. Dos conceptos clave en este análisis son el CAPEX y el OPEX. Comprender estos términos es esencial para tomar decisiones de inversión informadas.
- f) **Estándar.** Criterios establecidos por la entidad responsable de la actividad minera, así como por la legislación y avances tecnológicos, que permiten comparar y medir el desempeño y comportamiento industrial, indican la forma correcta y segura de realizar las actividades mineras. (SEARS ET AL., 2009)
- g) **Estrés térmico.** Se refiere a la carga térmica que los trabajadores experimentan y retienen en su organismo lo cual se origina por la interacción entre las condiciones ambientales del entorno laboral y la actividad física que desempeñan, además de la indumentaria que llevan puesta. (SEARS ET AL., 2009)
- h) **Fluido.** Se refiere a cualquier sustancia que tiene la capacidad de desplazarse. Esta descripción se aplica tanto a líquidos como a gases. Comúnmente, se considera que los gases son altamente compresibles, mientras que los líquidos son prácticamente incompresibles (SEARS ET AL., 2009)
- i) **Límites Máximos Permisible (LMP).** Se trata de medir la concentración o grado de componentes, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos que caracterizan a un flujo de salida o una liberación, y que, al excederse, pueden ocasionar daños a la salud, el bienestar humano y el entorno ambiental.
- j) **Manga de ventilación.** Un conducto diseñado específicamente para la extracción de aire, gases y polvo en las distintas actividades relacionadas con la minería. Además, también se emplea para el suministro de aire fresco.
- k) **Subniveles.** Durante esta actividad, se lleva a cabo la preparación para la explotación minera propiamente dicha, donde se abre la primera cara libre del primer corte con el objetivo de convertirse en una mina a cielo abierto o tajo.



- l) **Tajeos.** Se refieren a las ubicaciones donde se localizan las vetas, siendo estos los lugares estratégicos donde se extrae el mineral.
- m) **Ventilación.** Proceso encargado de garantizar un ambiente respirable y seguro dentro de la mina. Se establece un circuito de circulación de aire a través de las labores, utilizando dos accesos independientes o una combinación de acceso y tubería. Asimismo, los ventiladores son responsables de mover el aire tanto en la ventilación principal como en la secundaria. (SEARS ET AL., 2009)
- n) **Labores de preparación.** Son labores destinadas a crear las condiciones necesarias para acceder y extraer el mineral de manera segura y eficiente. Como apertura de Galerías o Construcción de túneles horizontales que permiten el acceso a las zonas de mineral, colocación de soportes y revestimientos para evitar derrumbes y garantizar la estabilidad de las galerías.
- o) **Labores de desarrollo.** Se refieren a las actividades y trabajos destinados a ampliar y mejorar las áreas de trabajo dentro de una mina para acceder a nuevas zonas de mineral y optimizar la eficiencia de la extracción. Estas labores incluyen la extensión de túneles y galerías, la construcción de rampas, la perforación y voladura de roca, y la instalación de infraestructura de transporte.
- p) **Labores de explotación.** Se refieren al conjunto de actividades y trabajos realizados para extraer minerales de un yacimiento. Estas labores incluyen la excavación, perforación, voladura y transporte del mineral desde el lugar de extracción hasta la superficie.
- q) **Gases.** Los gases en minería subterránea son compuestos que pueden liberarse durante las operaciones mineras y que, si no se controlan adecuadamente, pueden acumularse y causar problemas como explosiones, incendios, asfixia o intoxicación. “Estos gases pueden ser naturales, liberados por la roca y el mineral, o generados por actividades mineras como la voladura y el uso de maquinaria” (CAMPA, 2018)
- r) **OPEX (Operational Expenditure o Gasto Operativo)** El OPEX representa los costos diarios necesarios para mantener las operaciones de una mina. Son los gastos recurrentes que se generan para extraer y procesar el mineral.





## CAPÍTULO IV

### METODOLOGÍA

#### 4.1 Tipo y nivel de investigación

El tipo de investigación por su nivel de profundidad es predictivo y de nivel aplicativo, debido a que se busca predecir los resultados en cuanto a requerimiento de aire del circuito de ventilación en estudio aplicando el procedimiento que la investigación describe.

#### 4.2 Diseño de la investigación

El diseño de la investigación es no experimental, dado a que no se manipularán intencionalmente las variables de estudio.

#### 4.3 Descripción ética de la investigación (si le corresponde)

La presente investigación cumple con la ética de investigación porque plasmará en ella datos recogidos de campo, respetando los procedimientos, guías de trabajo y estándares de trabajo recogido y referenciado por autores anteriores, concluyendo así en un resultado nuevo y real aplicable en la unidad operativa Pampamarquino, así mismo se espera que pueda contribuir al conocimiento científico.

#### 4.4 Población y muestra

Es una investigación intencional direccionada no aleatoria, el estudio se realizará en el circuito de ventilación que involucra al sub nivel 4490 y al tajeo de explotación TJ 6420.

Y entendiendo de acuerdo a ese análisis la población del estudio esta constituida por toda la Unidad Minera de la Asociación de Mineros Artesanales Pepas de Oro, el cual viene a ser el principal objeto de estudio para la optimización de la ventilación,

Así como también, de acuerdo a la naturaleza de la investigación de naturaleza deductiva la muestra vendría a ser el sistema de ventilación de la mina el cual es el objeto central del análisis e investigación.



#### 4.5 Procedimiento

El procedimiento utilizado para optimizar el diseño del circuito de ventilación de la U. O. Pampamarquino comprende las siguientes fases:

- Diagnóstico. Se realizó a través del mapeo de ventilación para cuantificar las deficiencias en cantidad y calidad de aire en las labores.
- Planificación. Comprende el ordenamiento de estándares nacionales e internacionales y procedimientos de trabajo para la cobertura de aire para las labores, que servirán como punto de comparación para la optimización del diseño actual (ASHRAE 111, Reglamento de SSO en minería, otros)
- Implementación. Se realizó a partir de la simulación de datos en software (Ventsim Design 5.4), a partir del cual se elaborarán propuestas de mejora para el diseño del circuito de ventilación actual cumpliendo así la demanda de aire en las labores.
- Evaluación. Se realizó la evaluación económica de la implementación de un diseño del circuito de ventilación que optimice el circuito actual.

#### 4.6 Técnica e instrumentos

El procedimiento de la investigación emplea las técnicas de recolección y análisis de datos. Para la recolección de datos se hará uso de las técnicas de revisión del material documentario que permitió la obtención de 1) información relevante y necesaria de la unidad operativa Pampamarquino a través de planos de diseño del circuito actual, reportes de trabajo, reportes de producción, reportes de incidente y accidentes, entre otros. 2) la obtención de información digital en buscadores referentes a normas nacionales e internacionales sobre el cálculo y control del caudal de ventilación, límites máximos permisibles (LMP), confort térmico, entre otros. Otra técnica de recolección que se utilizó es observación cuantitativa, la cual permitirá la recolección de información cuantificable de la velocidad de aire (m/s), la presión de aire (in H<sub>2</sub>O, atm), la temperatura (°C), la humedad (%) y la concentración de gases (% , ppm), lo que constituye una fuente de información confiable mediante instrumentos de medición: manómetro, tubo de pitot, anemómetro y psicrómetro.

Además, se aplicó como técnicas de análisis de datos el análisis descriptivo y predictivo a través del uso de programas computacionales (software Ventsim Design 5.4., MS Excel, SPSS Statistics), que a su vez propiciaron la generación de reportes de la evaluación técnica y económica de las propuestas para optimizar el diseño del circuito de ventilación.



#### 4.7 Análisis estadístico

El análisis estadístico aplicado en la investigación corresponde a la estadística descriptiva e inferencial, para facilitar la ordenación y comparación de datos, asimismo se aplicará en la prueba de hipótesis la prueba de Shapiro Wilk cuya naturaleza de cálculo corresponde a la estadística inferencial para determinar el tipo de distribución que siguen los datos obtenidos en la simulación. Tras el desarrollo de la Prueba de Normalidad se aplica la estadística del Coeficiente de Pearson el cual corresponde a la estadística descriptiva debido a que trata de explicar el comportamiento de correlación entre los datos calculados en la simulación de acuerdo al resultado obtenido en dicha prueba.



## CAPÍTULO V

### RESULTADOS Y DISCUSIONES

#### 5.1 Análisis de resultados

##### 5.1.1 Determinación de las deficiencias del diseño actual del circuito de ventilación

###### 5.1.1.1 Descripción general del sistema de ventilación

El sistema de ventilación diseñado para las tareas mencionadas, de acuerdo con el plan de construcción del pique\_8261, posibilita la provisión de aire a lo largo de sus 60 metros de extensión y es un componente esencial del sistema de ventilación de la unidad operativa. En este sistema se incluye un ventilador auxiliar extractor situado en el punto donde el pique cruza el subnivel SN-4490. Para llevar el suministro de aire al subnivel, se emplean dos conductos de ventilación que parten de una conexión en forma de "Y" hacia la zona de trabajo correspondiente. La cuestión que se ha identificado radica en la insuficiente velocidad del flujo de aire en las salidas de los conductos, además de la notable percepción de calor y humedad en el área de trabajo (Ver Anexo 2).

###### 5.1.1.2 Indicadores de cantidad de aire en estaciones de monitoreo

Se consideraron dos estaciones de monitoreo principales para la medición del ingreso y salida de aire del SN\_449 para el desarrollo del balance de aire con respecto al requerimiento normado por la normativa sectorial correspondiente (DS N°024-2016-EM y su modificatoria DS N°023-2017-EM); antes del inicio del proyecto del pique de ventilación 8261, y la situación posterior a su construcción, pudiendo evidenciar así las mejoras en cuanto a eficiencia de ventilación en dicho nivel de explotación.



**Tabla 4 — Resumen de indicadores medidos en estaciones de ventilación del sistema actual**

N° Estación	Nivel	Labor	Descripción	Dirección de aire	Caudal (cfm)
EST-01	Superficie	PQ4590	Estación principal	Ingreso	13790
EST-02	Superficie	PQ4505	Estación principal	Salida	14980

De acuerdo a los valores anteriores (ver tabla 2), se tiene que el ingreso de caudal de aire fresco de 13790 pies cúbicos por minuto, por el pique 4590 y una salida de 14980 CFM por el pique 4505. Estos valores se utilizaron para realizar el cálculo de balance de aire y calibración más adelante.

### 5.1.1.3 Indicadores de calidad de aire en estaciones de monitoreo

Con el propósito de medir la calidad del aire respirado por los empleados en los diferentes niveles de trabajo de la unidad minera, en la evaluación de la ventilación se ha obtenido los siguientes resultados acerca de la concentración de los principales productos químicos presentes en el aire contaminado de la mina. El procedimiento de muestreo seguido se basa en el estándar UNI EN 1540, que implica la toma de muestras en un radio de 0,3 metros alrededor del área facial de los operadores, en la dirección de la fuente de aspiración en las estaciones de salida del aire contaminado. La información recopilada fue de gran utilidad como causa para evaluar la presencia de sustancias químicas contaminantes en el entorno laboral y su impacto en la productividad de los operadores, lo que es un indicador importante para verificar la eficacia del sistema de ventilación mecanizada en la unidad minera.

**Tabla 5 — Resumen de la concentración promedio de AQ en estaciones**

Agente químico	Concentración promedio AQ (ppm)				
	QST-01	QST-02	QST-03	QST-04	TWA

CO <sub>2</sub>	2500	1200	1700	900	5000
CO	3	4,3	0,89	5,68	25
NO	8,6	6,9	4,5	3,5	25
NO <sub>2</sub>	0,63	0,5	0,42	0,38	3
SO <sub>2</sub>	0,18	0,2	0,35	0,39	2

De acuerdo a los resultados mostrados en las tablas anteriores, la estación con mayor concentración de CO<sub>2</sub> es la estación QST-01 con una concentración de 2500 ppm, la estación con mayor concentración de CO es la estación QST-04 con una concentración de 5,68 ppm, la estación con mayor concentración de NO es la estación QST-01 con una concentración de 8,06 ppm, la estación con mayor concentración de NO<sub>2</sub> es la estación QST-01 con una concentración de 0,63 ppm, y en cuanto a los resultados de concentración de SO<sub>2</sub>, estos situaron en un rango irrelevante de concentración.

### 5.1.2 Determinación requerimiento de aire

Para calcular el requerimiento de aire en el SN-4490 se consideraron los siguientes parámetros de operación:

**Tabla 6 — Parámetros de operación SN-4490**

Cota promedio (msnm)	4537,4 (PQ4590)
Sistema de minado	Convencional
Perforación	Perforadoras Jack Leg y Jack Hammer
Consumo de madera	45 m <sup>3</sup> /día
Guardias al día	03
Máximo personal en Gdia/día	31
Disparo por día	02
Tiempo de ventilación promedio por guardia (min)	60 min

Explosivo	Emulsión encartuchada EMULNOR 1000 y 3000
Producción diaria	100 t/día (desmonte y mineral)

**a) Cálculo de requerimiento de aire por personal**

La elevación promedio empleada en el cálculo de la demanda de aire por empleado es la que corresponde a la entrada de la mina PQ4590, situada a una altitud de 4537,4 metros sobre el nivel del mar, y se tomó en consideración el turno con la mayor cantidad de trabajadores, que es el turno A (6:30 a.m.) con un total de 31 empleados por turno. De acuerdo con las disposiciones del Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en la Minería, el flujo de aire requerido por persona a altitudes superiores a los 4000 metros sobre el nivel del mar es de 6 metros cúbicos por minuto (m<sup>3</sup>/min). De esta manera, se determina que el caudal necesario para el personal es de 6588,53 pies cúbicos por minuto.

$$Q_{Tr} = F \times N(m^3/min) \quad \text{Ecuación [ 28 ]}$$

**Tabla 7 — Cálculo de requerimiento de aire por personal**

Personal	Total/ Gdia	F (Q persona)	m3/min (*)	CFM
Empresa minera	27,00	6,00	162,00	5720,98
Contratista	4,00	6,00	24,00	847,55
QTr	31,00	6,00	186,00	6 568,53

**b) Cálculo de requerimiento de aire por madera**



Los frentes de avance en la ejecución de las labores se refuerzan mediante el uso de marcos de madera, siguiendo las recomendaciones del departamento de geomecánica de la unidad minera. Principalmente, la madera se emplea en las excavaciones tradicionales de los niveles inferiores que se planea conectar en proyectos futuros con el SN-4490. En cuanto a la producción de material (desmote y mineral) en el proyecto en cuestión, se mantiene a un ritmo de 20 toneladas métricas por hora al día, lo que resulta en la obtención de un factor de 1,00 metro cúbico por minuto para calcular el requerimiento de aire debido al uso de madera, tal como lo establece el Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería, D.S. 024-2016-EM y su modificación en D.S.023-2017-EM. El consumo de madera representa el 45% de la producción diaria de material, por lo tanto, se estima una necesidad de 706,29 pies cúbicos por minuto para satisfacer esta demanda.

$$Q_{Ma} = Txu(m^3/min) \quad \text{Ecuación [ 29 ]}$$

**Tabla 8 — Cálculo de requerimiento de aire por madera**

	UND	Programado m <sup>3</sup> /mes	Programado m <sup>3</sup> /día	CONSUMO m <sup>3</sup> /día	%
<b>Global</b>	<b>m<sup>3</sup></b>	1200	100	45,00	45%

**c) Cálculo de requerimiento de aire por temperatura**

Según las mediciones de temperatura llevadas a cabo por el departamento de ventilación y seguridad de la unidad minera, en el nivel de profundidad 4480 se registran temperaturas que oscilan entre 21°C y 28°C desde después de la primera explosión hasta la finalización del turno de trabajo. En consecuencia, se estima que se necesita un flujo de aire de 1525,59 pies cúbicos por minuto (CFM) para mantener la velocidad del aire requerida y controlar la temperatura en estas áreas de trabajo.



$$Q_{T0} = V_m \times A \times N (m^3/min)$$

Ecuación [ 30 ]

Tabla 9 — Cálculo de requerimiento de aire por temperatura

Descripción	Valor	Unidad
Temp. Bulbo seco °C	28	°C
# Niveles	1	>23°C
Velocidad mín (vm)	30	m/min
Área (prom.)	1,44	m <sup>3</sup>
Qte	1 525,59	pie <sup>3</sup> /min

#### d) Cálculo de requerimiento por consumo de explosivo

El cálculo del requerimiento de aire para el consumo de explosivos se basa en factores como el área promedio de las labores, una velocidad mínima de 30 metros por minuto y el número de niveles de voladura en un turno de trabajo, de acuerdo con el Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería, D.S. N°024-2016-EM y su modificación D.S. N°023-2017-EM. Utilizando estos criterios, se determinó el requerimiento de aire. Según la Tabla 8, el requerimiento total de aire para el consumo de explosivos asciende a 4576,78 pies cúbicos por minuto (CFM).

$$Q_{Ex} = A \times V \times N (m^3/min)$$

Ecuación [ 38 ]

Tabla 10 — Cálculo de requerimiento de aire por consumo de explosivo

# NIVELES	3	
VELOCIDAD MÍN (Vm)	30	m/min
AREA (Prom.)	1,44	m2
Qex	4 576,78	pie <sup>3</sup> /min

**e) Cálculo de requerimiento de aire por fugas**

Se aplicó un factor del 15% para cubrir el requerimiento adicional debido a las fugas en el sistema de ventilación, en conformidad con la normativa sectorial aplicable. Para calcular el requerimiento de aire debido a las fugas, se sumaron los requerimientos previamente calculados para el personal, los equipos diésel y el control de temperatura. El resultado obtenido para compensar las pérdidas por fugas, según la Tabla anterior (ver tabla 9), es de 2007 pies cúbicos por minuto (pie<sup>3</sup>/min).

$$Q_{Fu} = 15\% \times Q_{t1} (m^3/min) \quad \text{Ecuación [ 37 ]}$$

**Tabla 11 — Cálculo de requerimiento de aire por fugas**

Descripción	Denominación	Valor	Unidad
Personal	QTr	6 569	pie <sup>3</sup> /min
Madera	Qma	706	pie <sup>3</sup> /min
Temperatura	Qte	1 526	pie <sup>3</sup> /min
Equipos	Qeq	4 577	pie <sup>3</sup> /min
Subtotal	QT1	13 377	pie <sup>3</sup> /min
Fugas 15%	Qfu	2 007	pie <sup>3</sup> /min

**f) Cálculo de requerimiento de aire total**

En consecuencia, el requerimiento total del sistema de ventilación ascenderá a 15 348 pies cúbicos por minuto (pie<sup>3</sup>/min).

**Tabla 12 — Cálculo de requerimiento de aire total**

Descripción	Denominación	Caudal de aire (pie <sup>3</sup> /min)
Personal	QTr	6 569



Madera	Qma	706
Temperatura	Qte	1 526
Equipos	Qeq	4 577
Subtotal	QT1	13 377
Fugas 15%	Qfu	2 007
<b>TOTAL</b>	<b>Qto</b>	<b>15 384</b>

**g) Balance de aire en el sistema de ventilación actual**

Para realizar el balance de aire, se toman en cuenta los caudales medidos por el área de ventilación y SSOMA, que incluyen el caudal de entrada de aire fresco a través del pique 4590 de 13,790 pie<sup>3</sup>/min, el caudal de salida de aire viciado a través del pique 4505 de 14,980 pie<sup>3</sup>/min, y el requerimiento de aire calculado según la normativa de minería, que es de 15,384 pie<sup>3</sup>/min.

**Tabla 13 — Cálculo del balance de aire SN-4490**

<b>Distribución de Aire</b>	<b>pie<sup>3</sup>/min</b>
Total de aire requerido	15 384
Ingreso de aire	13790
Salida de aire	14980
<b>Cobertura (%)</b>	89,64%
<b>Déficit (pie<sup>3</sup>/min)</b>	- 1 594

### 5.1.3 Propuesta de mejora en el sistema de ventilación actual

#### 5.1.3.1. Entrada de parámetros ambientales en el software Ventsim Design

Para configurar correctamente el software de diseño y simulación de ventilación, es imprescindible disponer de datos y parámetros específicos relacionados con el entorno minero. Estos datos incluyen el coeficiente de fricción 'K', la altitud, la temperatura, la densidad, la presión y otros factores que son esenciales para garantizar que el modelo de simulación sea preciso y se asemeje a la realidad. Además, es crucial que el flujo de aire representado en las redes de ventilación diseñadas refleje valores muy cercanos a los que se han medido en el sitio.

**Tabla 14 — Configuración de parámetros ambientales**

<b>MEDIO AMBIENTE</b>	
(RESET)	NO
Aire densidad de flujo compresible	1.21 Kg/m <sup>3</sup>
Ajuste temperatura superficie	SI
Años actual	2023.795
Calor específico de la roca	790.0 J/KgC
Conductividad térmica de la roca	2.00 W/mC
Densidad de la roca (Opcional si )	2,700 Kg/m <sup>3</sup>
Densidad de aire en la red	1.21 Kg/m <sup>3</sup>
difusividad térmica de la roca	0.938 m <sup>2</sup> /s 10-6
edad del conducto de aire	5.000 años
Elevación superficie de la rejilla	4,537.4 m
Fracción de la humedad de la roca	0.15
Gradiente geotérmico	1.8 C/100m
Presión barométrica en la superficie	29.9 en Hg
Superficie atmosférica tasa de lap	6.4 C/1000m
Superficie de referencia de humedad	73.1 R
Superficie de referencia elevación	0.0 m
Temperatura de la roca superficie	20.0 C
Temperatura del bulbo húmedo en	15.0 C
Temperatura del bulbo seco en la	18.0 C
Fuente: VentSIM	

#### 5.1.4 Modelamiento del sistema actual de ventilación

Para hacer posible que las velocidades del flujo del aire, correspondan a lo registrado en campo, se hizo uso de diferentes medios de regulación faltantes como puertas, cortinas, etc. Estas características fueron introducidas a Ventsim, configurando en sus herramientas de edición. Una vez creado el modelo con todos los detalles, se hizo la verificación (validez) del flujo (caudal), comparando los resultados obtenidos por el simulador con los datos medidos en mina (correlación).

**Tabla 15 — Correlación de datos del sistema actual de ventilación en Ventsim Design**

N° Estación	Nivel	Labor	Descripción	CAUDAL CAMPO	CAUDAL VENTSIM	% VARIACION
EST-01	Superficie	PQ4590	Estación principal	13790	14290	-3,63%
EST-02	Superficie	PQ4505	Estación principal	14980	14305	4,51%

Según la teoría, cuando la variación se encuentra por debajo del 10%, interpretamos que existe una correspondencia entre el modelo y el sistema de ventilación presente en la mina. Esta coincidencia es considerada satisfactoria, y se considera aún más óptima si la variación se aproxima al 3%. Los resultados de obtenidos en la correlación de caudales simulados en el Ventsim en las diferentes estaciones de monitores están dentro del margen del  $\pm 5\%$  correspondiente a los medidos en el campo, por lo tanto, se considera que el modelo creado en el Ventsim está muy cercano a las condiciones en campo y es representativo para el estudio.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el modelamiento de ventilación del sistema actual de ventilación en el SN-4490.

**Tabla 16 — Resumen sobre la red del sistema del sistema de ventilación actual**

Característica	Descripción
----------------	-------------



Flujos de aire compresible	Si
La presión de ventilación natural	Si
Tipo de simulación de la presión del ventilador	Método de la presión total
Etapas	0: Etapa 1
Todos los conductos de aire	217
Actual etapas conductos	177
Segmentos de etapa actual	84
Longitud total	1,1801 m
Caudal de aire total de admisión	16,002 pie <sup>3</sup> /min
Caudal de aire total de escape	16,019 pie <sup>3</sup> /min
Flujo de masa total	9,00 kg/s
Resistencia de la mina (sin tubo)	5,68604 Ns <sup>2</sup> /m <sup>8</sup>
Resistencia de la mina (Incluyendo el conducto)	95,56383 Ns <sup>2</sup> /m <sup>8</sup>
Potencia del AIRE (pérdida por fricción)	55,3 hp Total
Potencia eléctrica de entrada	82,6 hp
Fuente: VentSIM	

### 5.1.5 Propuesta de mejora al corto plazo

Con la propuesta a corto plazo se espera una mejora del caudal percibido en los desarrollos de labores de profundización y tajeos de explotación; es necesario trabajar en el incremento del caudal y presión de aire para poder cubrir la demanda de aire en la explotación del tajeo TJ-6420 hasta su culminación, estos trabajos involucran la reubicación de ventiladores, la culminación de la construcción de desarrollos como Bypass y chimeneas de ventilación que conformen un circuito de ventilación que reduzca la resistencia de mina y permita la evacuación eficaz de aire viciado.

A continuación, se detallan los trabajos a realizar:

- a) Construcción del PQ\_8261 de 1.40 m x 2.40 m a partir de los proyectos de construcción de la chimenea ECH\_8260 de sección 1.20 m x 1.20 m con longitud de 8.10 m, chimenea CH\_8260 de 1.20 m x 1.20 m con longitud de 12.80 m, cámara CA\_6414 de 1.60 m x 1.60 m con longitud de 7 m, estocada ES 6427 DE 3.0 m x 3.0 m con longitud de 5 m en el nivel 4490.





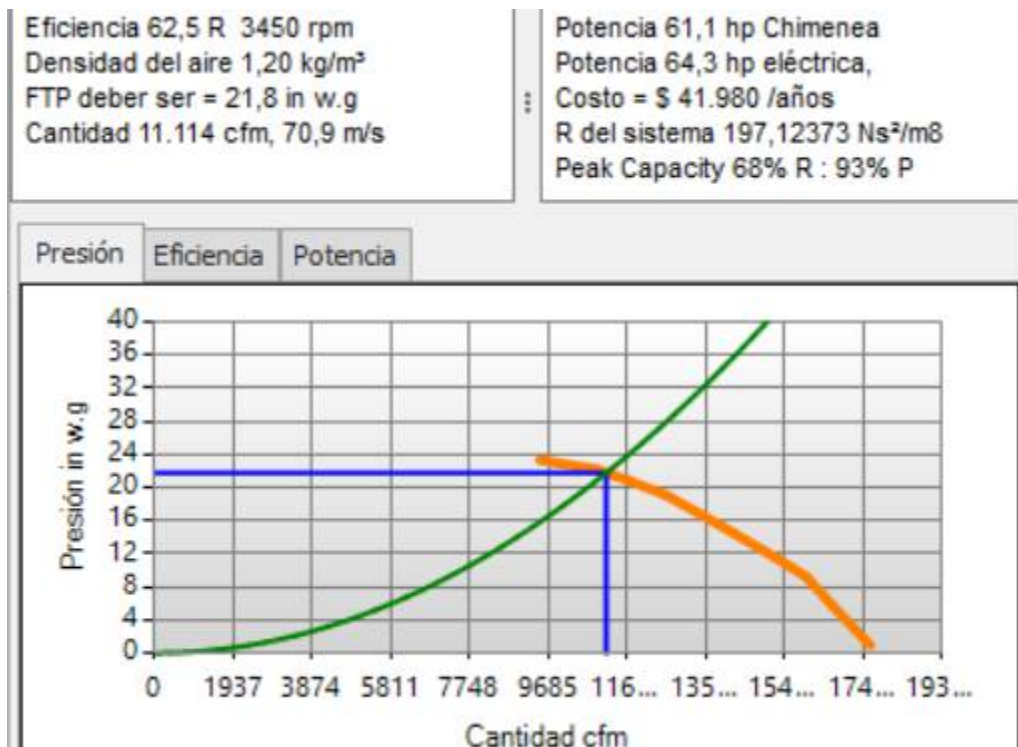


Figura 24 — Características y curva de ventilador principal VAV-32-14

- c) Instalación de un ventilador VAV-32-14 con caudal menor a 11,000 pie<sup>3</sup>/min en el nivel 4510, a fin de cubrir la demanda de aire en los niveles superiores de explotación NV4510, NV 4505 y NV 4500.

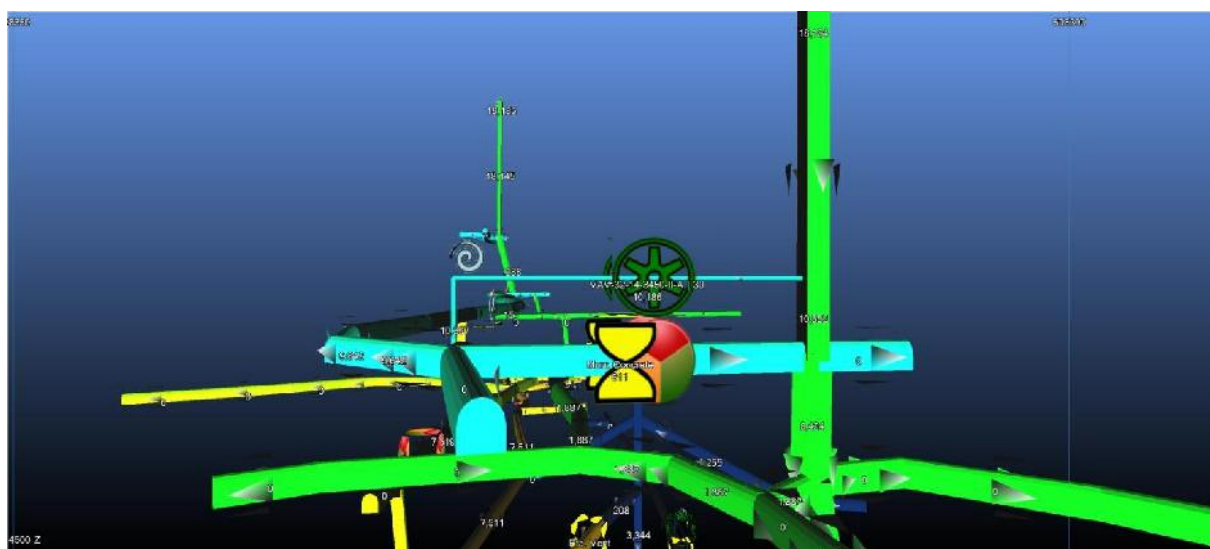


Figura 25 — VAV-32-14

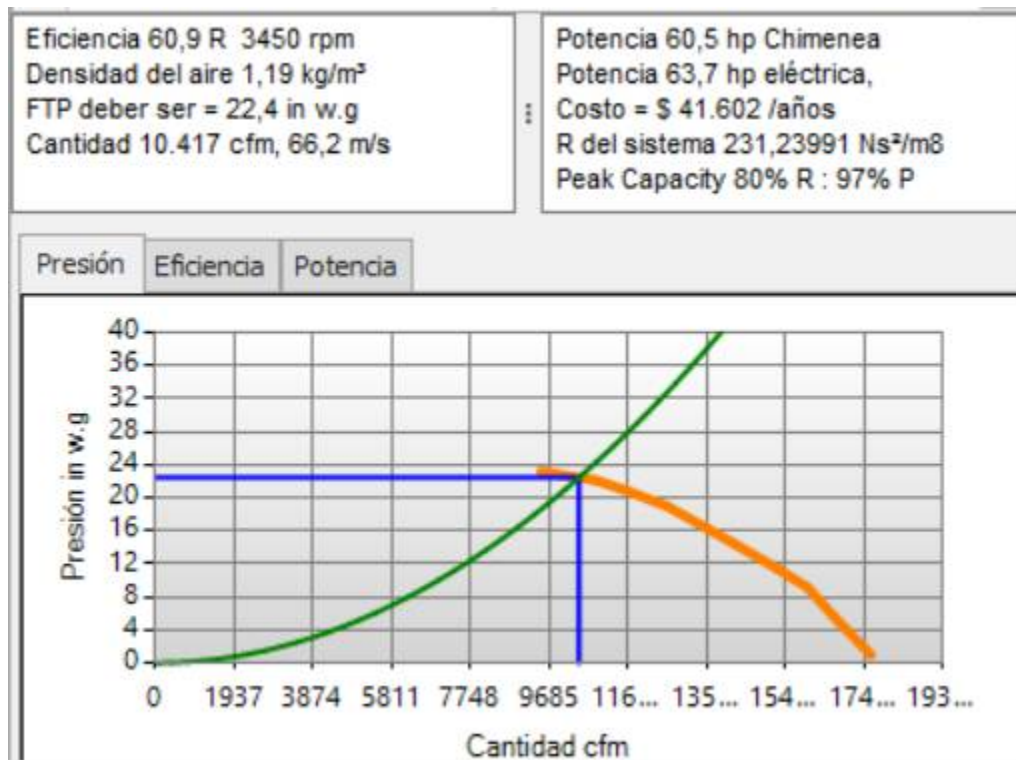
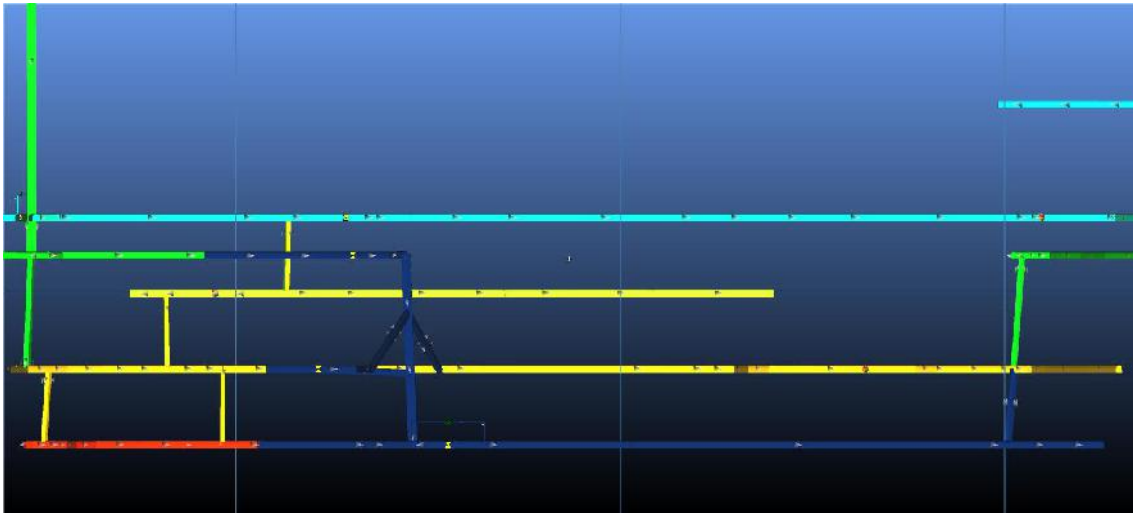


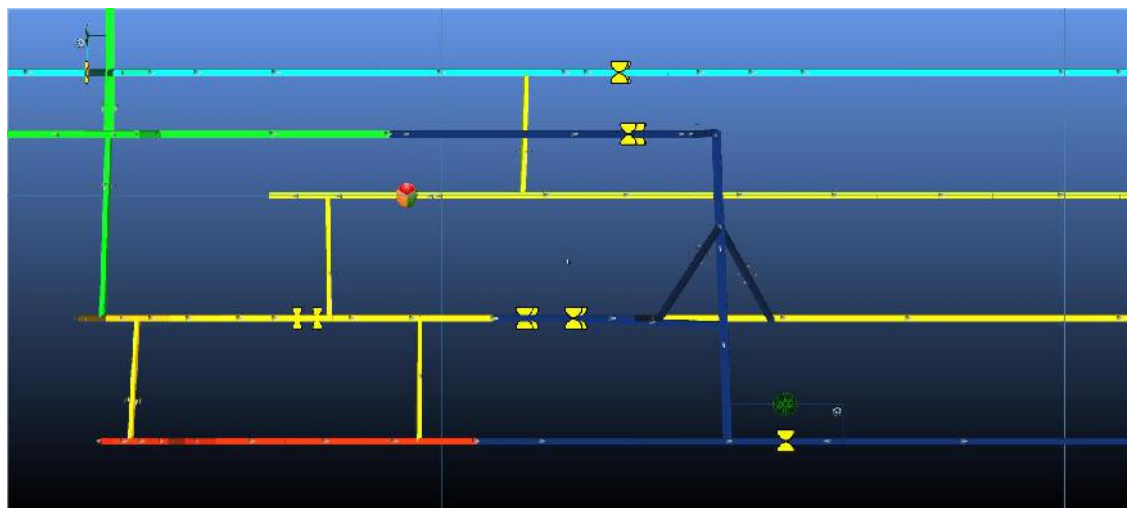
Figura 26 — Características y curva de ventilador principal VAV-32-14

- d) Una vez culminado el proyecto del PQ 8261, se desarrolla la construcción del crucero CX\_4480 de 1,60 m x 1,90 m con 110 m de longitud a fin de conducir el aire viciado producto de la profundización de labores en el nivel 4480 y la explotación del tajeo 6420 en la zona este hacia la zona oeste para poder retirar el aire por la chimenea CH-4480 y a posterior por el pique 4505 hacia superficie.



**Figura 27 — CX\_4480**

- e) Implementación de cortinas de ventilación con resistencia mínima de  $2 \text{ Ns}^2/\text{m}^8$  en los niveles NV4510, NV4505 y NV4490 con la finalidad de distribuir eficazmente los caudales de ingresos de aire en los niveles en mención de acuerdo al nivel de explotación practicado en ellos.



**Figura 28 — Cortinas de ventilación**

### 5.1.6 Resultado del circuito de ventilación aplicando las mejoras a corto plazo

Tabla 17 — Tabla resumen sobre la red del sistema de ventilación a corto plazo

Característica	Descripción
Flujos de aire compresible	Si
La presión de ventilación natural	Si
Tipo de simulación de la presión del ventilador	Método de la presión total
Etapas	1: Etapa 2
Todos los conductos de aire	217
Actual etapas conductos	202
Segmentos de etapa actual	92
Longitud total	1 448,6 m
Caudal de aire total de admisión	18 129 pie <sup>3</sup> /min
Caudal de aire total de escape	18 149 pie <sup>3</sup> /min
Flujo de masa total	10,20 kg/s
Resistencia de la mina (sin tubo)	1,229 630 Ns <sup>2</sup> /m <sup>8</sup>
Resistencia de la mina (Incluyendo el conducto)	90,654 06 Ns <sup>2</sup> /m
Potencia del AIRE (pérdida por fricción)	76,300 hp Total
Potencia eléctrica de entrada	128hp

### 5.1.7 Cuantificación del costo de implementación del diseño del circuito de ventilación

Definir los costos de Inversión (CAPEX) y Operación (OPEX) para garantizar el sistema eficiente de ventilación es crucial para la operación minera, porque depende mucho de las otras actividades; tales como perforación, voladura, sostenimiento, limpieza, transporte, bombeo, etc. que estarán directamente relacionado a la calidad del sistema de ventilación primaria y secundaria. Por eso se toma énfasis en las proyecciones de los costos de inversión y operación, que repercutirá en el tiempo.

#### a. Costos de inversión

Tabla 18 — CAPEX en proyectos a corto plazo

Ítem	Proyecto	Descripción	Nivel	Diámetro (m)/Sección (m)	Long (m)	Cant.	P.U. / m (US\$/m)	Costo (US\$)
1	Instalación y reubicación de ventiladores	Reubicación ventilador VAV-32-14	NV- 4480			1	300	300
2		Instalación ventilador 11000 cfm	NV- 4510			1	500	500
3		Tapón oncreto vventilador 11000 cfm	NV- 4510			1	3000	3000
4		Hermetización de tapones	NV- 4510			2	150	300
5	Desarrollo de chimenea y labores auxiliares	ECH 8260	NV- 4290	1,20 x 1,20	8.1	1	502	4066, 2
6		CH 8260	NV- 4290	1,20 x 1,20	12.8	1	502	6425, 6
7		CA 6414	NV- 4290	1,60 x 1,60	7	1	550	3850
8		ES 6427	NV- 4290	3,00 x 3,00	5	1	610	3050
9		PQ 8261	NV- 4290	1,40 x 2,90	10	1	650	6500
10		CX 4480	NV- 4480	1,60 x 1,90	110	1	550	60500
11		CH 4480	NV- 4480	1,20 x 1,20	10	1	502	5020
Total								93 512

## b. Costo de operación

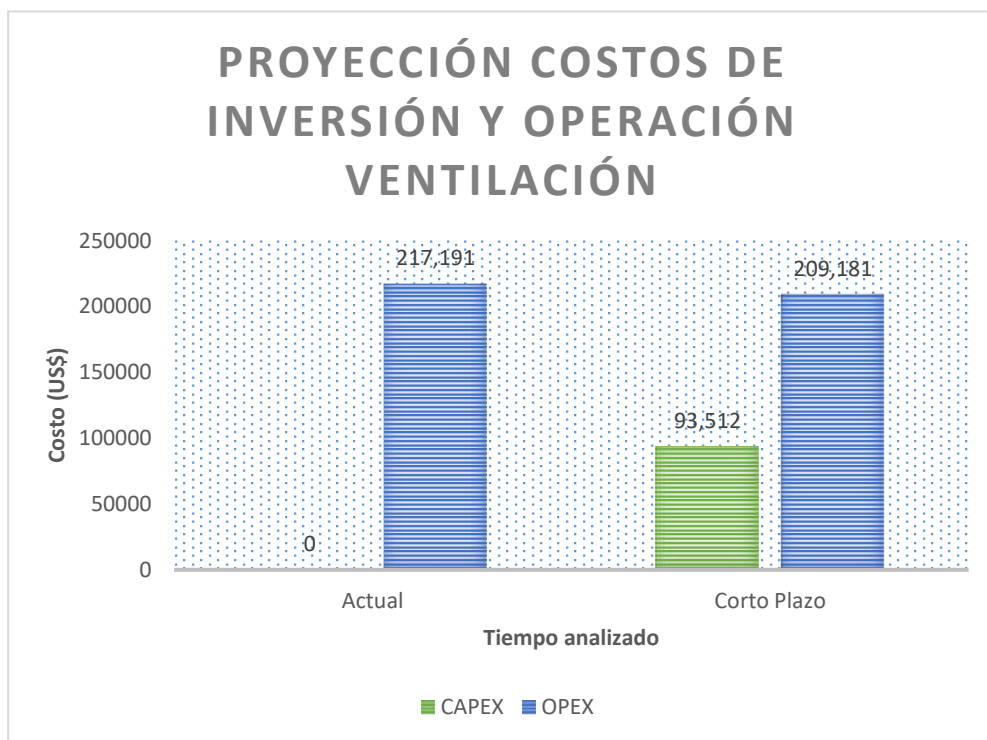


**Tabla 19 — OPEX en proyectos a corto plazo versus situación actual**

Item	Descripción	U/M	Actual	Corto plazo
1	Periodo	años	-	1
2	Producción de mineral (Referencial)	TM/año	12 000,00	12 000,00
3	Costo unitario de energía	US\$/Kw-h	0,04	0,04
4	Caudal Requerido	Cfm	15 383,78	15 383,78
5	Caudal de Ingreso (aire fresco)	Cfm	13 790,00	18 129,00
6	Caudal de salida (aire contaminado)	Cfm	14 980	18 149
8	Cobertura %	%	90%	118%
9	Pérdidas por fricción	Kw	41	56,9
11	Potencia eléctrica de ENTRADA	kW / año	62	95
12	Costo por consumo de Energía	US\$/año	53 935	83 582
13	Mano de obra	US\$/año	110,000	72,832
14	Costo de Regulación de flujo	US\$/año	40,000	40,000
15	Mantenimiento/Repuestos (6.5%)	US\$/año	13,256	12,767
Total		US\$/año	217,191	209,181

**c. Resumen de costos****Tabla 20 — Resumen de costos de inversión y operación Costo**

	Actual	Corto Plazo
CAPEX	-	93 512
OPEX	217 191	209 181



**Figura 29 — Comparación de costos proyectos a corto plazo versus la situación actual**

## 5.2 Contratación de hipótesis

### Descripción de variables e indicadores

Se describen en la siguiente tabla (Ver tabla 19).

**Tabla 21 — Variables e indicadores de hipótesis general.**

Variables	Indicadores
Variable independiente (X) = Diseño del circuito de ventilación.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Eficiencia de ventilación (%)</li> <li>- Costos (US\$)</li> </ul>
Variable dependiente (Y) = Cobertura de aire.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Caudal de aire (cfm)</li> </ul>

**Tabla 22 — Base de datos utilizada**

Muestra	Descripción	Caudal de aire	Caudal de aire Requerido
		cfm	Cfm
1	Actual	13790,00	15383,78
2	Corto Plazo	18129,00	15383,78

### Prueba de normalidad

Se obtuvo la Tabla 21 del software SPSS 25, en ella se presenta la prueba de normalidad de las variables predefinidas para la hipótesis general.

Debido a que el tamaño de muestra introducido es dos (02) se toma en cuenta el análisis por Shapiro-Wilk.

**Tabla 23 — Prueba de normalidad de las variables**

	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
Actual	0,894	9	0,220
Corto Plazo	0,935	9	0,531

Donde:

gl = grado de libertad (tamaño de muestra)

sig = significancia (p-valor)

Debido a que la significancia (sig.) de las variables es mayor a 0,05, se acepta la hipótesis nula (H0) y se rechaza la hipótesis alterna (H1).

**Entonces los datos de ambas variables siguen una distribución normal.**

### Correlación de variables



Se aplicó el método de correlación de variables de Pearson, debido a que ambas variables siguen una distribución normal.

**Tabla 24 — Correlación de variables**

		Actual	Corto Plazo
KG/TON	Correlación de Pearson	1	-0,907**
	Sig. (bilateral)		0,001
	N	9	9
TON/TJ	Correlación de Pearson	-0,907**	1
	Sig. (bilateral)	0,001	
	N	9	9

De acuerdo a la tabla 22; la significancia es menor a 0,05, por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula (H0) y se acepta la hipótesis alterna (H1).

**Entonces, existe correlación entre las variables.**

Además, se obtiene el factor de correlación de Person igual a -0.907 para ambas variables, ello representa un nivel de correlación negativa muy fuerte entre las variables.

**Prueba de hipótesis de muestras correlacionadas**

En la hipótesis general se intenta demostrar que “Diseño del circuito de ventilación influye en la mejora de la cobertura de aire en U.O. Pampamarquino”

Es por ello que se analizará el nivel de relación de las medias de los indicadores mediante la prueba paramétrica “T-Student” para los indicadores:

- Caudal de aire en la situación actual. (cfm)
- Caudal de aire con los proyectos a corto plazo. (cfm)

El objetivo es demostrar la optimización de la cobertura de aire expresado en caudal de aire (cfm) tras el diseño del circuito de ventilación.



Se realizó la correlación de las muestras emparejadas, obteniendo la siguiente tabla (Tabla 23) que muestra la prueba de muestras emparejadas.

**Tabla 25 — Prueba de muestras**

		Diferencias emparejadas					t	Sig. (bilateral)
		Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza de la diferencia			
					Inferior	Superior		
1	Cobertura Actual - Cobertura MP	236,50222	198,22230	66,07410	84,13508	388,86937	0,579	0,007

De acuerdo a la tabla 23; la significancia es menor a 0,05, por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula (H0) y se acepta la hipótesis alterna (H1).

Entonces, las medias no son iguales y sí hay diferencia significativa entre los indicadores. Por lo tanto, se concluye que el diseño del circuito de ventilación mejora significativamente la cobertura de aire en U.O. Pampamarquino.

### 5.3 Discusión

El sistema de ventilación diseñado para estas tareas es fundamental en el proyecto de construcción del pique\_8261, ya que proporciona aire a lo largo de sus 60 metros de extensión. Además, incluye un ventilador auxiliar extractor en el punto donde el pique se cruza con el subnivel SN-4490. Para llevar el aire al subnivel, se utilizan dos conductos de ventilación que parten de una conexión en forma de "Y" hacia la zona de trabajo. Sin embargo, se ha identificado un problema de flujo de aire insuficiente en las salidas de los conductos, junto con altas temperaturas y humedad en la zona de trabajo.

Se realizaron mediciones en dos estaciones de monitoreo principales antes y después de la construcción del pique de ventilación 8261, con el propósito de evaluar la eficiencia del



sistema de ventilación en el nivel de explotación SN\_449. Los resultados mostraron un caudal de entrada de aire fresco de 13,790 pie<sup>3</sup>/min por el pique 4590 y un caudal de salida de 14,980 pie<sup>3</sup>/min por el pique 4505, según los datos proporcionados por el área de Ventilación y SSOMA de la unidad minera. Estos valores se utilizarán para realizar el cálculo de balance de aire y calibración en etapas posteriores.

De acuerdo al cálculo de requerimiento de aire en el proyecto se observó un déficit en la cobertura de caudal de aire, llegando al 89,64% en el requerimiento de mina con el actual sistema de ventilación. Por tal motivo se propusieron una planificación en la modificación del sistema de ventilación actual a corto plazo, en el cual se obtuvo resultados positivos en cuanto a caudal de aire suministrado.

La propuesta a corto plazo tiene como objetivo principal mejorar el flujo de aire en las operaciones de profundización y explotación en el tajeo TJ-6420. Para lograr esta mejora, se han delineado una serie de trabajos estratégicos que incluyen la construcción del pique PQ\_8261, la reubicación de ventiladores, la instalación de nuevos ventiladores, la construcción de un crucero y la implementación de cortinas de ventilación. Estas acciones están diseñadas para optimizar el sistema de ventilación, reducir la resistencia en la mina y permitir una evacuación eficaz del aire viciado, garantizando así un entorno laboral más seguro y eficiente para las operaciones mineras en el SN-4490.

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1 Conclusiones

De acuerdo a los resultados, se hace necesario efectuar diversos cambios en la estructura del sistema de ventilación de la mina, de acuerdo a las mediciones realizadas para determinar las deficiencias en los circuitos de ventilación, obteniendo resultados de falta de caudal de aire fresco, así como también los requerimientos que involucran reubicación de ventiladores para lograr la optimización y la necesaria hermetización de algunas puertas de ventilación lo cual da como consecuencia una variación en los costos de operación para subsanar las deficiencias, de esta forma se lograría la optimización del circuito de ventilación dando como resultado la adecuada cantidad y calidad de aire requerido en las labores de la U.O Pampamarquino.

Se llevaron a cabo mediciones en dos estaciones de monitoreo clave antes y después de la construcción del pique de ventilación 8261 para evaluar la eficacia y las deficiencias del sistema de ventilación en el nivel de explotación SN\_449. Los resultados indicaron que el caudal de entrada de aire fresco por el pique 4590 era de  $13,790\text{pie}^3/\text{min}$ , mientras que el caudal de salida por el pique 4505 alcanzaba los  $14,980\text{pie}^3/\text{min}$ . El análisis del requerimiento de aire reveló un déficit de cobertura, llegando al 89,64% con el sistema de ventilación actual.

El requerimiento de aire en calidad y cantidad necesaria a corto plazo contempla los siguientes trabajos a realizar: la construcción del pique PQ\_8261 con dimensiones de 1,40 m x 2,40 m, derivado de proyectos de construcción de chimeneas y otras estructuras en el nivel 4490; la reubicación del ventilador actual VAV-32-14 en el nivel 4480, en una posición que garantice caudales suficientes para las operaciones en dicho nivel y para satisfacer la demanda de aire necesaria para la explotación del TJ-6420; la instalación de un ventilador VAV-32-14 con un caudal inferior a  $11,000\text{pie}^3/\text{min}$  en el nivel 4510, para atender la demanda de aire en los niveles superiores (NV4510, NV4505 y NV4500); la



construcción del crucero CX\_4480 de 1,60 m x 1,90 m y 110 m de longitud para dirigir el aire viciado generado en el nivel 4480 y la explotación del tajeo 6420 de este a oeste, permitiendo su evacuación a través de la chimenea CH-4480 y posteriormente por el pique 4505 hacia la superficie; y la implementación de cortinas de ventilación con una resistencia mínima de  $2 \text{ Ns}^2/\text{m}^8$  en los niveles NV4510, NV4505 y NV4490, con el objetivo de distribuir eficazmente los caudales de entrada de aire en estos niveles de acuerdo a las operaciones en curso.

En el corto plazo (04 semanas), se considera la reubicación de mangas de ventilación, del ventilador principal, el reemplazo de mangas deterioradas y la hermetización de la puerta de ventilación. Aunque el caudal total alcanza 43871, no satisface la demanda necesaria. Los costos de energía anual ascienden a aproximadamente \$174829 debido a cambios en los alabes del ventilador. La cobertura esperada al corto plazo es del 118% del caudal de aire requerido para el SN-4490 con un costo de inversión de 93512 US\$ y un costo de operación total de 209181 US\$/año, el cual representa un ahorro del 3,68% del costo actual de operación de 217191 US\$/año que posee la U.O Pampamarquino. Tomando este dato en cuenta se espera un periodo de recuperación de la inversión en los próximos 11 años siguientes a la ejecución del proyecto del pique 8261.

## 6.2 Recomendaciones

Es urgentemente recomendable efectuar todas las previsiones que se generaron como resultado del estudio, así como realizar permanente monitorización de los parámetros de ventilación con respecto a la cobertura de aire en cantidad y calidad, para confirmar el buen funcionamiento del sistema de ventilación logrando de esta forma un mejor resultado en la optimización del sistema una vez ya implementado las mejorías.

Debido a que mediante la investigación se logró determinar las deficiencias del diseño de circuito de ventilación, se recomienda realizar un estudio a largo plazo del SN-4490, contemplando la explotación de los tajeos por debajo del SN-4490 a fin de evaluar la expansión del pique 8261 y la adquisición de ventiladores de mayor capacidad a fin de cubrir la demanda de aire para su explotación.

Es necesario realizar la permanente monitorización para lograr la eficiente y adecuada cobertura de aire, de acuerdo a las propuestas de solución planteadas para evitar esta falencia en cada una de las labores de preparación y llevar a efecto un estudio asociado al estrés térmico percibido por los colaboradores evaluando la intensidad de trabajo, el tipo



de actividad y factores de corrección de acuerdo al tipo de vestimenta utilizado en cada área de trabajo representativa, a fin de evaluar el parámetro de temperatura en las labores en un entorno convencional (no equipos petroleros) debido a que no fue factible la evaluación de este en el software de ventilación debido a la ausencia de herramientas específicas para ello.

Debido a que en el informe se pudo determinar el costo de implementación del diseño de circuito de ventilación mediante la evaluación económica empleando indicadores de especial relevancia como el OPEX y CAPEX, siendo necesario la inmediata financiación de la propuesta planteada en el informe de acuerdo al monto total calculado, asimismo, llevar a cabo un análisis exhaustivo de la presencia de gases generados por las explosiones y cómo los planes propuestos pueden afectar su eliminación, evaluando los posibles riesgos para la salud de los trabajadores en el proyecto.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

- BADEN HINSLEY, F. 2020. *Subsurface Ventilation Engineering*. . 2020.
- BALDEON MONTORO, O. 2021. *Diagnóstico comunicacional para la Asociación Pepas de Oro de Pampamarca (AMAPOP)*. . 2021.
- CAMPA, ANTONIO. 2018. <https://1library.co/>. [En línea] Enero de 2018. <https://1library.co/article/gases-en-minas-subterr%C3%A1neas-manual-de-rescate-minero>.
- CARABAJO, C. 2015. *Diseño del circuito de ventilación de la zona norte de la mina cabo de hornos, ubicada en el distrito aurífero - polimetálico portovelo – Zaruma*. Quito : Universidad Central de Ecuador, 2015.
- CASTILLO, D. R. 2017. *Evaluación del sistema de ventilación de la mina El Roble*. 2017.
- CAXI, ARNOLD KEVIN. 2017. *Generación de escorrentia, disponibilidad de agua y usos del suelo*. s.l. : Universidad José Carlos Mariátegui, 2017.
- D.S. N° 023-2017-EM. 2017. *Modifican diversos artículos y anexos del reglamento de seguridad y salud ocupacional en minería, aprobado por Decreto Supremo N° 024-2016-EM*. s.l. : Decreto Supremo, Ministerio de Energía y Minas, 2017.
- FONTTIS, G. 2020. *Estudio y diseño 3D del sistema de ventilación para su optimización actual y proyectada, caso estudio mina Inmaculada - HOCHSCHILD MINING*. s.l. : HOCHSCHILD MINING, 2020.
- FUENTES, RAMIREZ Y. 2019. *Modelamiento del sistema de ventilación y control de Metano con el simulador*. Polonia : Universidad de Concepción de Chile, 2019.
- GÓMEZ, O. 2016. *Diseño y optimización del sistema de ventilación para mejorar el ambiente subterráneo, caso U.M. Animon - U.E.A. Chungar S.A.C.* . 2016.
- GUIZÁBALO, J. 2017. *Modelamiento Predictivo Del Flujo De Aire Para La Optimización Del Sistema De Ventilación En El Nivel 4093 De La Unidad Minera Santa BÁRBARA DE TRUJILLO*, 2017. s.l. : Universidad Nacional de Trujillo, 2017.
- HERBERT, JUAN HERRERA. 2019. *Introducción a la ventilación minera*. Madrid : s.n., 2019.
- HERNÁNDEZ, R., FERNÁNDEZ, C. Y BAPTISTA, M. 2003. *Metodología de la Investigación*. Mexico. 2003.
- HERRERA, H. 2019. *INTRODUCCIÓN A LA VENTILACIÓN MINERA*. 2019.
- HOWARD, L., HARTMAN Y MUTMANSKY. 1961. *Mine ventilation and air conditioning*. Alabama: John Wiley & Sons, 2012. 1961.
- HUAMANÍ, J. 2020. *Mejoramiento del sistema de ventilación subterránea de la Mina Condor IV, Minera El Palacio del Cóndor S.A.C.* . s.l. : Universidad Nacional del Centro del Perú., 2020.



- JIMENEZ, P. 2011. *VENTILACIÓN DE MINAS SUBTERRÁNEAS Y TÚNELES*. . Lima : s.n., 2011.
- KARAGIANNI Y BENARDOS. 2021. *Ventilation Design Modeling and Optimization for an Underground Bauxite Mine*. 2021.
- LEIVA BUSTAMANTE, BRAYAN ANTONIO. 2020. *Sistema de Ventilación para una Mina Caving Mediante Inteligencia Artificial*. Chile : Universidad de Talca, 2020.
- LLACHO, CESAR Y VARGAS, ARMANDO. 2020. *Estudio del sistema de ventilación para el control de agentes químicos y físicos, U.O. Pallancata – veta Pablo – 2018*. s.l. : Universidad Tecnológica del Perú., 2020.
- LOAYZA, A. 2021. *Optimización del sistema de ventilación a corto plazo en la Unidad Operativa Pallancata - Ayacucho*. Cusco : Universidad Nacional de San Antonio de Abad del Cusco., 2021.
- MALEKI, S., SOTOUDEH, F. Y SERESHKI, F. 2018. *Application of VENTSIM 3D and mathematical programming to optimize underground mine ventilation network*. s.l. : A case study, 2018.
- MALLMA MUÑOZ, BELTRAN. 2023. *Implementación del software ventsim para optimizar el sistema de ventilación en el nivel Caira 4 de la mina Huinac Huaraz - 2023*. Abancay : s.n., 2023.
- MINAM. *Límite Maximo Permisible (LMP)*. s.l. : Ministerio del Ambiente.
- Nematollahi, A. 2021. *Mine ventilation circuits in an underground mine of northern Italy*. 2021.
- OJEDA DE LÓPEZ, J., QUINTERO, J. Y MACHADO, I. 2007. *La ética en la investigación*. 2007.
- OXFAM INTERNACIONAL. 2020. *ÉTICA DE LA INVESTIGACIÓN: UNA GUÍA PRÁCTICA*. . 2020.
- PORTILLA, R. E. Y VELARDE, B. P. 2015. *Propuesta técnica de mejora del sistema de ventilación principal de una operación minera subterránea polimetálica - 2015*. 2015.
- REGLAMENTO DE SEGURIDAD Y SALUD OCUPACIONAL DE MINERÍA. 2016. *Anexo 38 del Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional de Minería D.S.024-2016-EM: CÁLCULO DE REQUERIMIENTO DE AIRE*. 2016.
- RICSE, R. W. 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*. 2021.
- RIVERA POMA, J. M. 2020. *Riesgo de estrés térmico en trabajadores expuestos al calor en un proceso térmico*. Lima : Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2020.



- RIVERA, G. 2020. *Análisis del circuito de ventilación mediante simulación con ventsim de una mina subterránea de carbón artesanal en la provincia de Arauco, Región del Biobío*. . s.l. : Universidad de Concepción, 2020.
- SALCANTAYMINING. 2018. *Parámetros físicos de ventilación. Minería Geología y civil*. 2018.
- SEARS, F. W., ZEMANSKY, M. W. Y YOUNG, H. D. 2009. *Física Universitaria*. . s.l. : Pearson, 2009.
- SUTTY, J. 2016. *Influencia de la ventilación mecánica, en el diseño del sistema de ventilación del nivel 4955 mina urano sac*. Puno : UNAP, 2016.
- VARGAS, O. 2014. *Diseño del circuito en un sistema de ventilación natural de la zona de Gisela*. Arequipa : s.n., 2014.
- VERGARAY, R. M. 2017. *Optimización Del Sistema De Ventilación De La Mina Charito, Compañía Minera Poderosa S.A.* s.l. : Universidad Nacional de Trujillo, 2017.
- WANG, J., Y OTROS. 2022. *Regulation and Optimization of Air Quantity in a Mine Ventilation Network with Multiple Fans*. 2022.
- XIN, S., Y OTROS. 2022. *Application of data envelopment analysis in the ventilation and cooling efficiency evaluation of hot development headings*. 2022.



## ANEXOS



Anexo 1

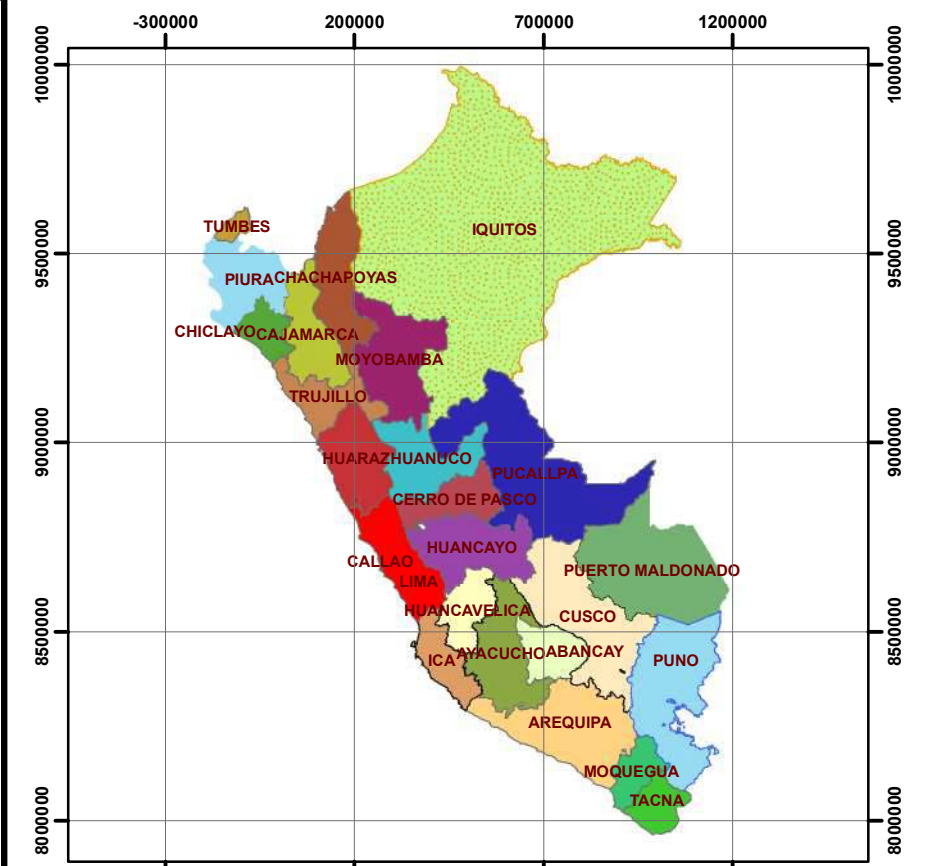
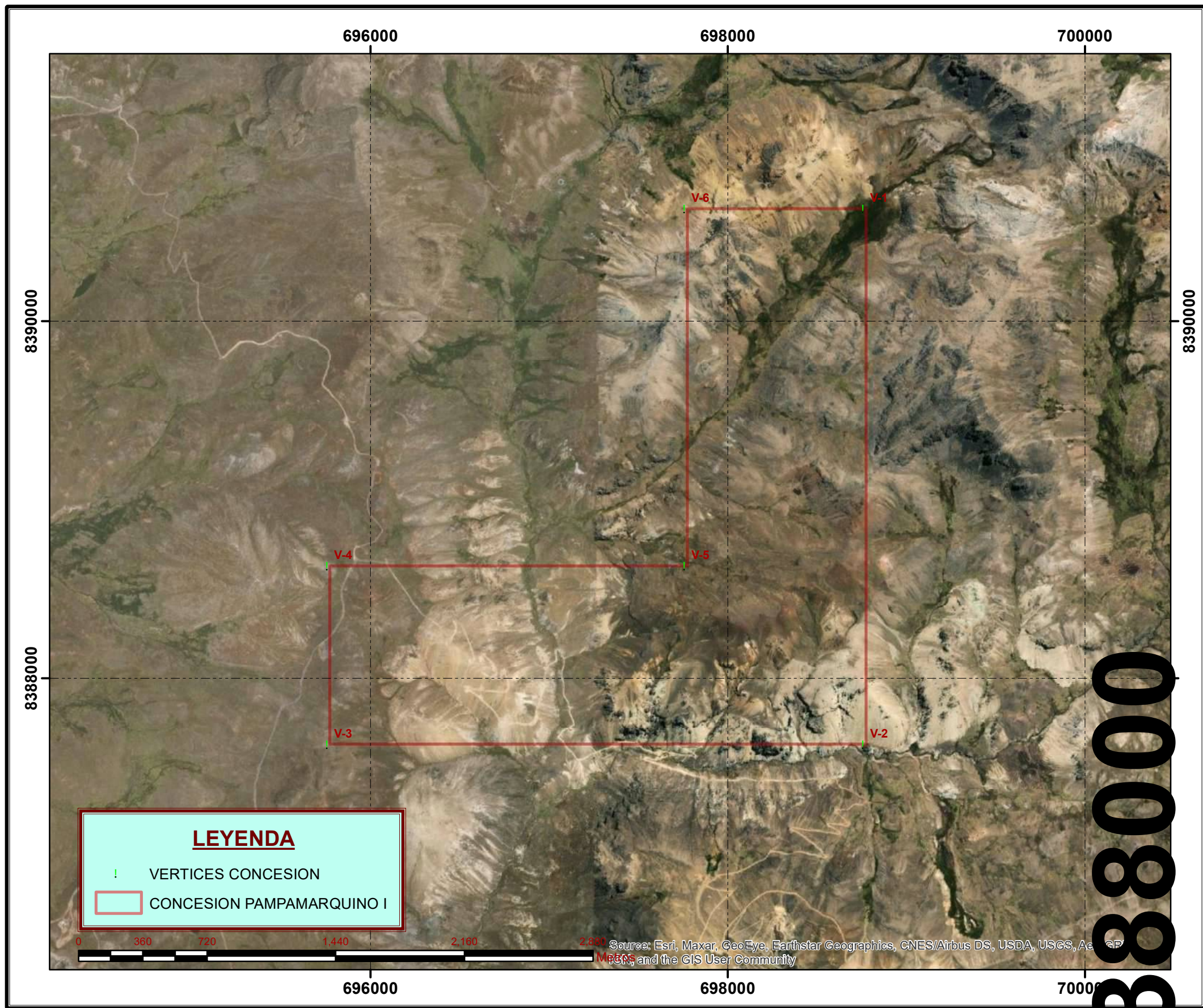
Tabla 26 — Matriz de consistencia

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	METODOLOGÍA	VARIABLES
<p>Problema General</p> <p>¿Cómo optimizar el diseño del circuito de ventilación para la cobertura de aire en cantidad y calidad requerido por las labores de preparación y explotación de la U.O. Pampamarquino – Aymaraes, 2023?</p> <p>Problemas específicos</p> <p>¿Cuáles son las deficiencias del diseño actual del circuito de ventilación para las labores de preparación y explotación de la U.O.</p>	<p>Objetivo general</p> <p>Optimizar el diseño del circuito de ventilación para la cobertura de aire en cantidad y calidad de aire requeridas para las labores de preparación y explotación de la U.O. Pampamarquino – Aymaraes, 2023.</p> <p>Objetivos específicos</p> <p>Determinar las deficiencias del diseño actual del circuito de ventilación para las labores de preparación y explotación de la U.O. Pampamarquino – Aymaraes, 2023.</p>	<p>Hipótesis general</p> <p>La optimización de diseño del circuito de ventilación cumple con la cobertura de aire en cantidad y calidad de aire requerido por las labores de preparación y explotación de la U.O. Pampamarquino - Aymaraes, 2023.</p> <p>Hipótesis específicas</p> <p>Existe relación entre las deficiencias del diseño del circuito de ventilación actual y el requerimiento de aire en las labores de preparación y explotación de la U.O. Pampamarquino – Aymaraes, 2023.</p>	<p>Tipo de investigación</p> <p>La investigación es del tipo predictivo</p> <p>Nivel de investigación</p> <p>El nivel de la investigación es aplicativo.</p> <p>Diseño de investigación</p> <p>El diseño de la investigación es no experimental.</p> <p>Población y muestra</p> <p>Intencional direccionada no aleatoria, el estudio se realizará en el circuito de ventilación que</p>	<p>Variable</p> <p>Independiente:</p> <p>X = Diseño del circuito de ventilación.</p> <p>Indicadores</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Eficiencia de ventilación</li> <li>– Eficiencia térmica</li> <li>– OPEX</li> <li>– CAPEX</li> </ul> <p>Variable Dependiente:</p>

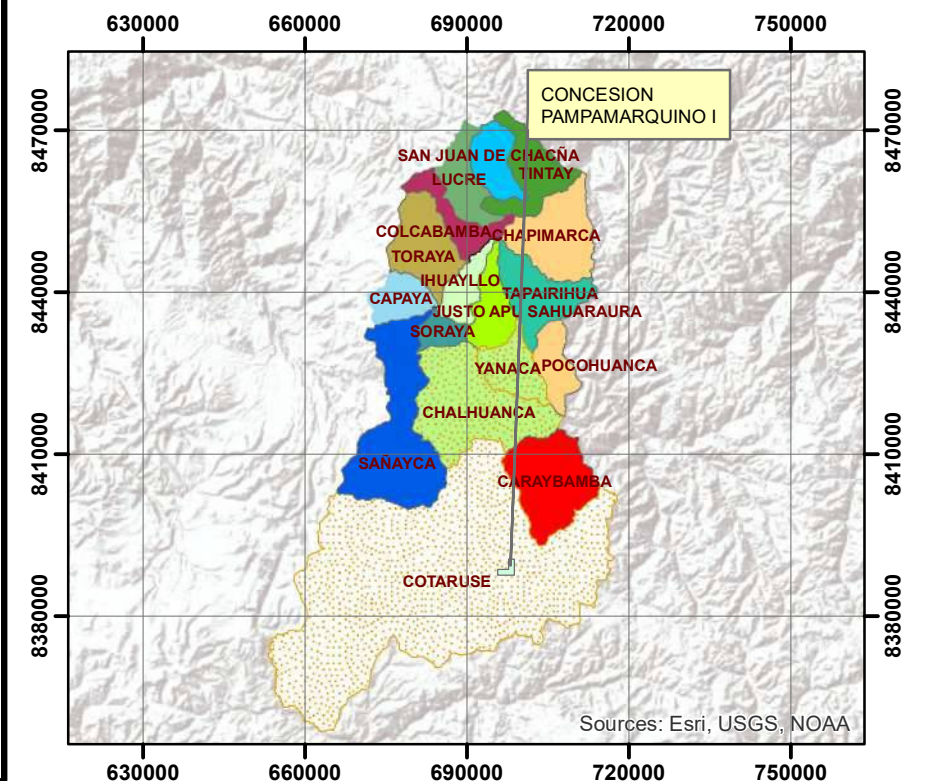


<p>Pampamarquino – Aymaraes, 2023?</p> <p>¿Cuál es la cobertura de aire en calidad y cantidad requeridas por las labores de preparación y explotación de la U.O. Pampamarquino – Aymaraes, 2023?</p> <p>¿Cuál es el costo de implementación del diseño del circuito de ventilación para la cobertura de aire requeridas por las labores de preparación y explotación de la U.O. Pampamarquino – Aymaraes, 2023?</p>	<p>Calcular el requerimiento de aire en calidad y cantidad necesarias para el confort en las labores de preparación y explotación de la U.O. Pampamarquino – Aymaraes, 2023.</p> <p>Cuantificar el costo de implementación del diseño del circuito de ventilación para la cobertura de aire requeridas por las labores de preparación y explotación de la U.O. Pampamarquino – Aymaraes, 2023.</p>	<p>Existe relación entre el requerimiento de aire en calidad y cantidad necesarias y el confort en las labores de preparación y explotación y el confort en las labores de preparación y explotación de la U.O. Pampamarquino – Aymaraes, 2023.</p> <p>El costo de implementación del diseño del circuito óptimo es menor a Corto plazo que el costo operativo del diseño de circuito de ventilación actual para la cobertura de aire requerido por las labores de preparación y explotación de la U.O. Pampamarquino – Aymaraes, 2023.</p>	<p>involucra al sub nivel 4490 y al tajeo de explotación TJ 6420.</p> <p>Técnicas</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Revisión del material documentario</li> <li>– Observación cuantitativa</li> <li>– Análisis descriptivo y predictivo</li> </ul> <p>Instrumentos</p> <p>Manómetro, tubo de pitot, anemómetro, psicrómetro, termómetro, Ventsim Design 5.4., MS Excel y SPSS Statistics.</p>	<p>Y = Cobertura de aire</p> <p>Indicadores</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Concentración de oxígeno</li> <li>– Concentración de gases contaminantes</li> <li>– Concentración de polvos</li> <li>– Caudal de aire</li> <li>– Presión de aire</li> <li>– Resistencia</li> </ul>
---	--	---	--	---





MAPA POLITICO DEL PERU  
ESCALA 1:20,000,000



MAPA DE LOCALIZACION DISTRITAL  
ESCALA 1:1,400,000

3388000

CUADRO DE COORDENADAS CONCESION PAMPAMARQUINO I		
DATUM WGS - 84 ZONA 18 SUR		
VERTICES	ESTE	NORTE
V-1	698773.23	8390629.77
V-2	698773.26	8387629.74
V-3	695773.32	8387629.75
V-4	695773.31	8388629.76
	697773.27	8388629.75
	697773.25	8390629.77

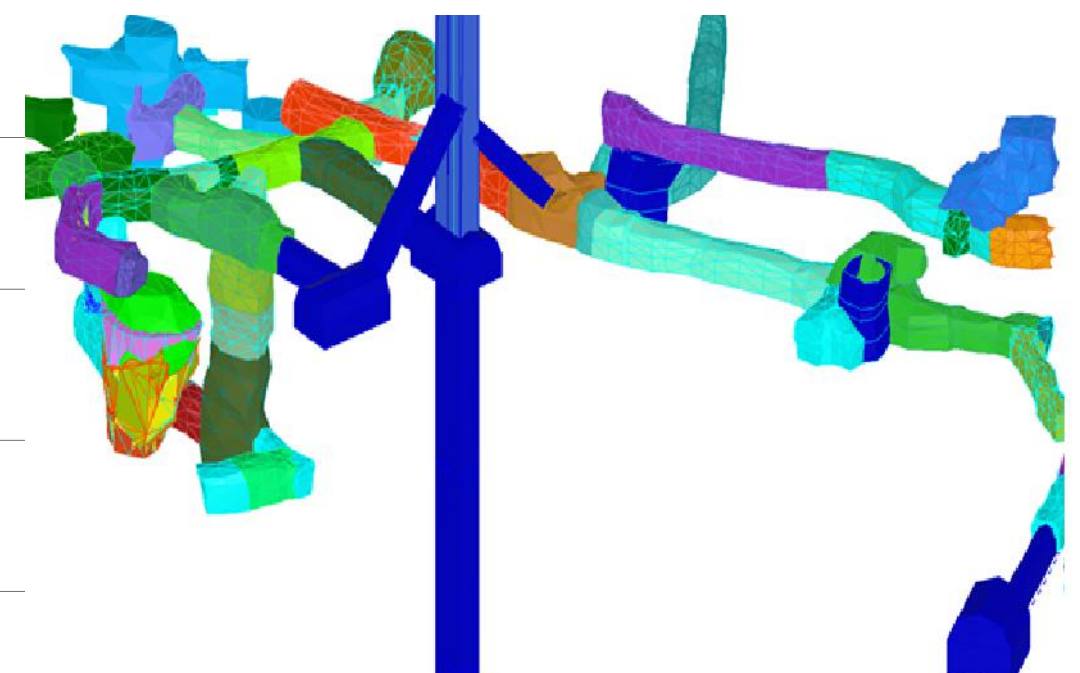
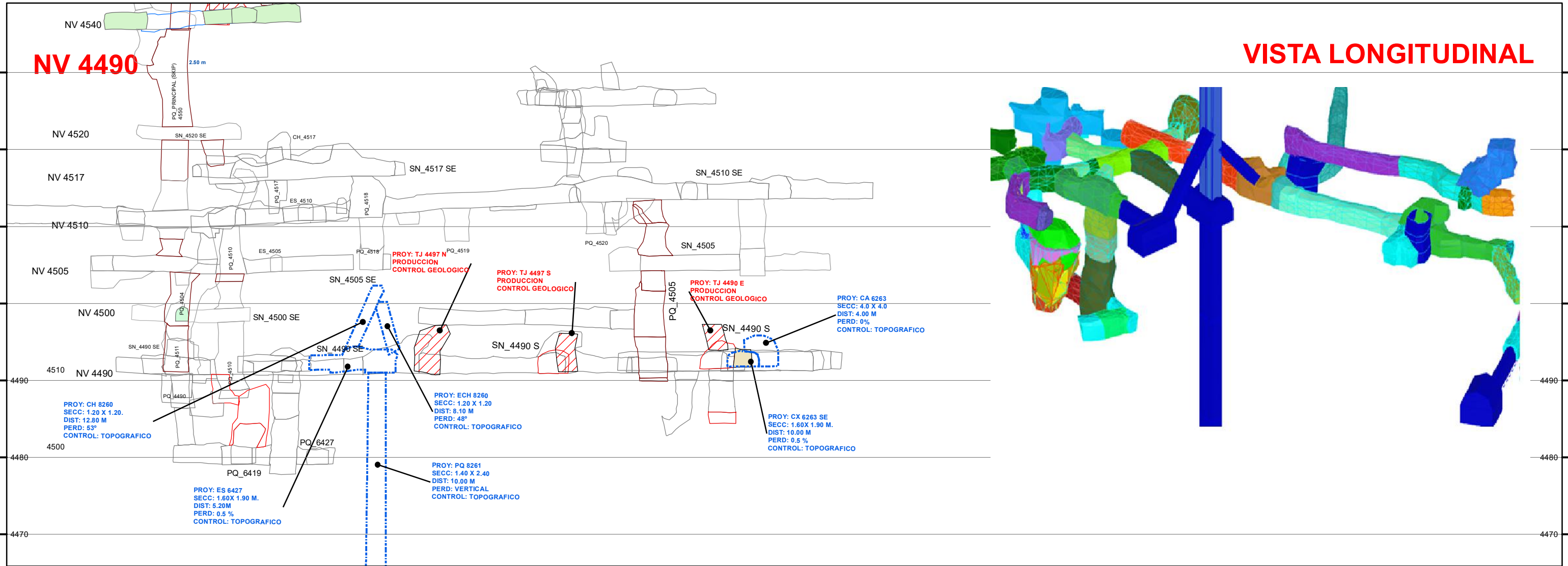
TOPOGRAFIA: Leonel Ortiz Ramirez Marco Antonio Puma Robles
DISEÑO: Leonel Ortiz Ramirez Marco Antonio Puma Robles
REVISADO: Ing. NELSON MEZA PEÑA
APROBADO: POR ASESOR

ASOCIACION DE PEPEÑOS ARTESANALES PEPAS DE ORO "PAMPAMARCA"		LAMINA: 01
<b>PLANO DE UBICACION NV_4490 TJ 6420</b>		
FECHA: DICIEMBRE 2023	ESCALA: 1: 24,000	ARCHIVO: REPOSITORIO



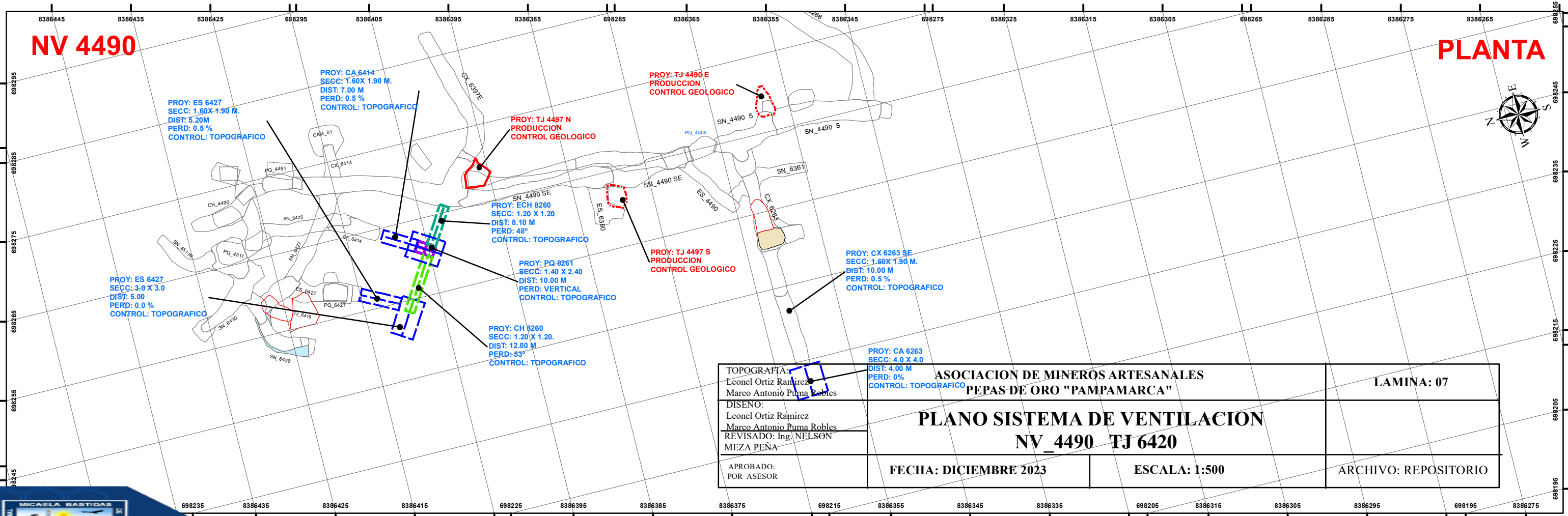
NV 4490

VISTA LONGITUDINAL



NV 4490

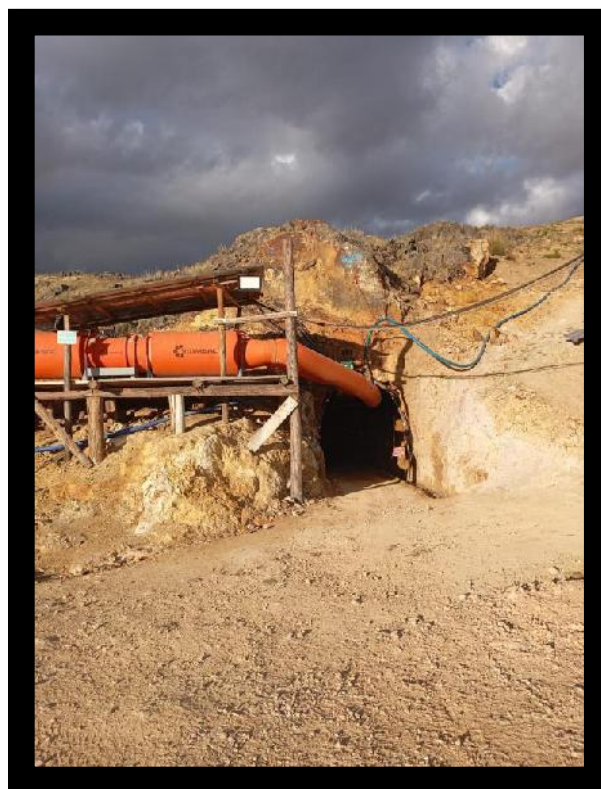
PLANTA



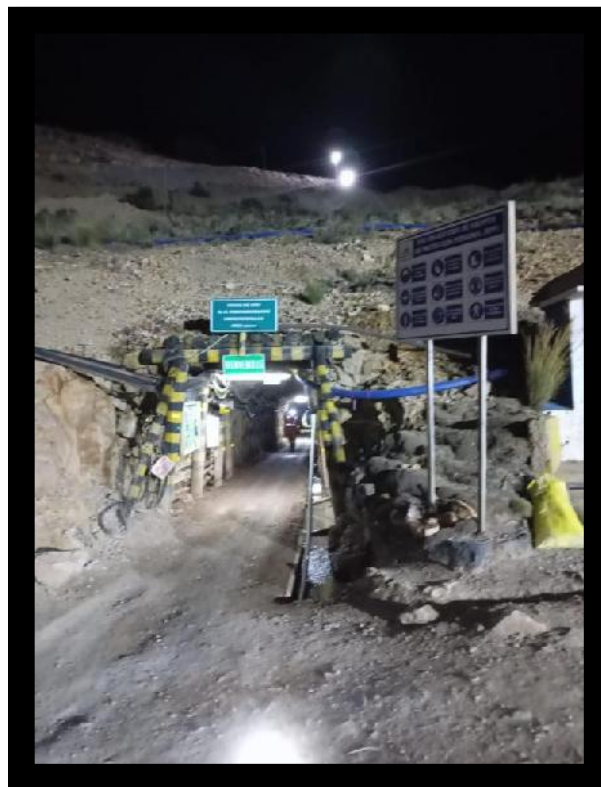
TOPOGRAFIA: Leonel Ortiz Ramirez Marco Antonio Puma Robles	ASOCIACION DE MINEROS ARTESANALES PEPAS DE ORO "PAMPAMARCA"		LAMINA: 07
DISEÑO: Leonel Ortiz Ramirez Marco Antonio Puma Robles REVISADO: Ing. NELSON MEZA PEÑA	PLANO SISTEMA DE VENTILACION NV_4490 TJ 6420		
APROBADO: POR ASESOR	FECHA: DICIEMBRE 2023	ESCALA: 1:500	ARCHIVO: REPOSITORIO



## Anexo 2 Registro Fotográfico



**Figura 32 — Vista del ventilador principal**



**Figura 33 — Ingreso por la bocamina para posterior medición**

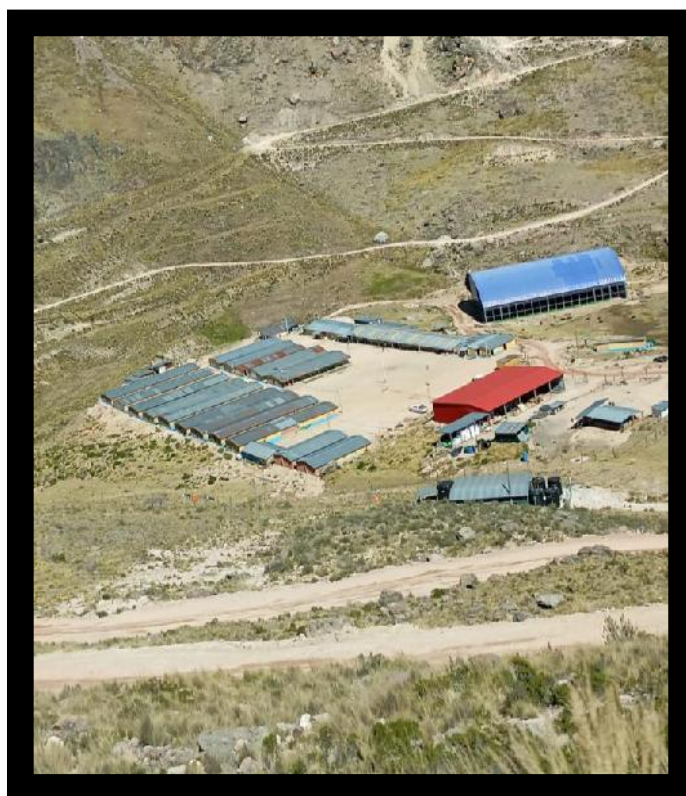
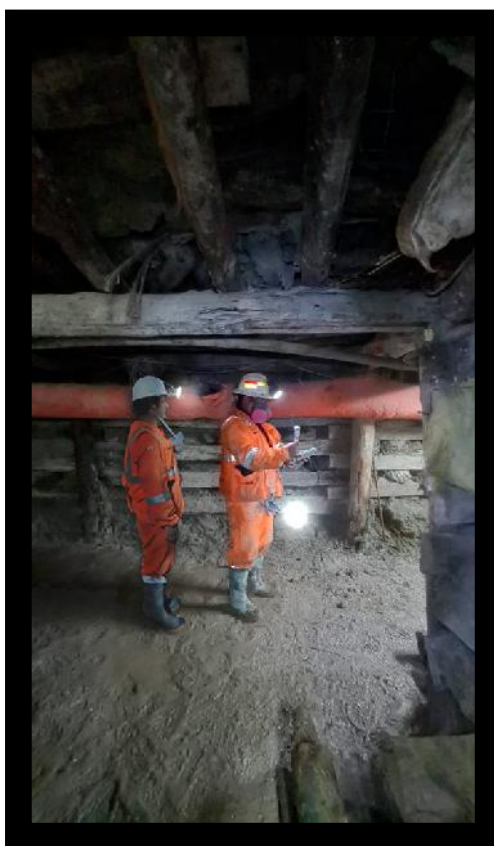


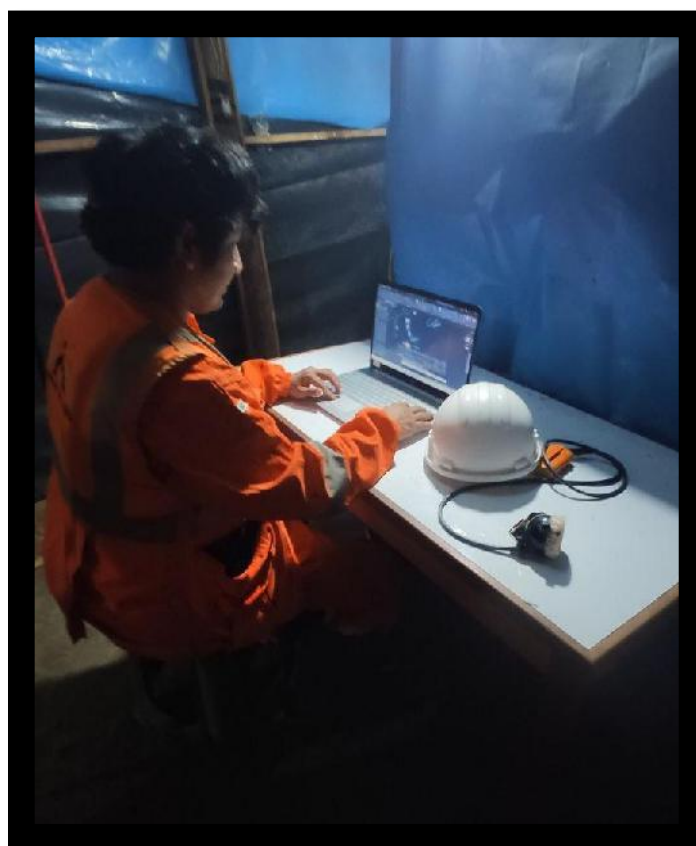
Figura 34 — Fotografía aérea del campamento de la U.O. Pampamarquino



Figura 35 — Vista de una galería con su manga de ventilación.



**Figura 36 — Monitorización de gases y medición**



**Figura 37 — Posterior procesamiento de los datos obtenidos para simulación**

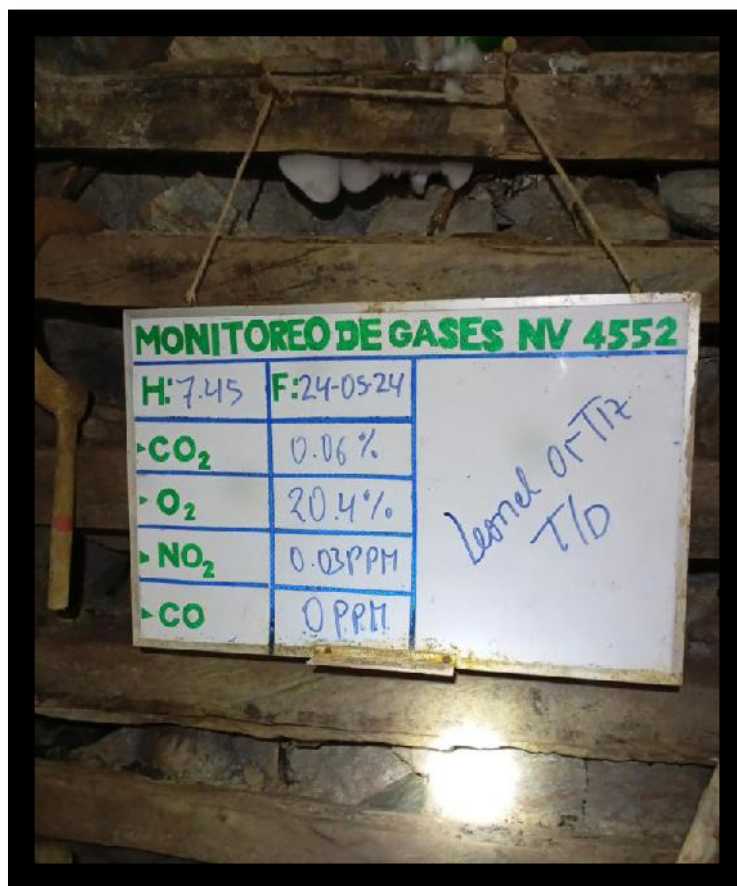


Figura 38 — Resultado de monitoreo de gases.

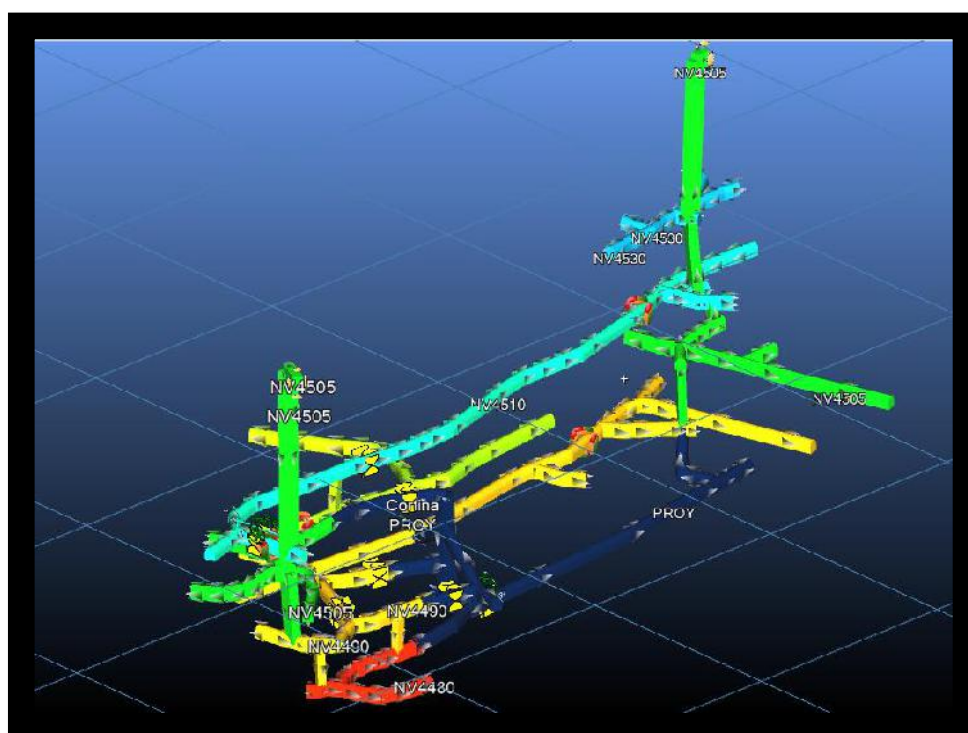


Figura 39 — Visualización de las labores proyectadas en color azul