



# UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

## FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS

### ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



## EFFECTIVIDAD DEL SISTEMA DE INYECCIÓN DE AIRE PARA EL PROYECTO SAN GERMÁN NV 4185, U.M. SAN RAFAEL

### TESIS

#### PRESENTADA POR:

**PEDRO LUIS CHAMBI CHAHUARA**

#### PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

**INGENIERO DE MINAS**

**PUNO, PERÚ**

**2024**



# PEDRO LUIS CHAMBI CHAHUARA

## EFFECTIVIDAD DEL SISTEMA DE INYECCIÓN DE AIRE PARA EL PROYECTO SAN GERMÁN NV 4185, U.M. SAN RAFAEL

 Universidad Nacional del Altiplano

### Detalles del documento

Identificador de la entrega  
trn:oid::8254:416599843

106 Páginas

Fecha de entrega  
16 dic 2024, 12:46 p.m. GMT-5

19,958 Palabras

Fecha de descarga  
16 dic 2024, 12:50 p.m. GMT-5

105,878 Caracteres

Nombre de archivo  
3. PEDRO LUIS CHAMBI CHAHUARA.pdf

Tamaño de archivo  
2.6 MB





## 8% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

### Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 12 palabras)

### Fuentes principales

- 7% Fuentes de Internet
- 1% Publicaciones
- 5% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

### Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.



 Ing. Jorge Durabú Broden  
CIP: N° 47280



 DIRECCIÓN  
FIM - UNAP  
Americo Arizaca Avalos  
Director de la Unidad de Investigación  
Facultad de Ingeniería de Minas





## DEDICATORIA

- A Dios por su amor y voluntad por darme fortaleza y aliento en los momentos difíciles.
- A mis padres, Feliciano Chambi Maraza y Natalia Chahuara Quilla quienes me dieron su respaldo moral y su motivación para desarrollar mis metas en el campo académico.

**Pedro Luis Chambi Chahuara**



## AGRADECIMIENTOS

- A la Universidad Nacional del Altiplano por permitirme desarrollar mis estudios de pregrado.
- A los catedráticos de la Universidad Nacional del Altiplano y de la Facultad de Ingeniería de Minas, quienes contribuyeron en mi formación permanente.
- A mi asesor D. Sc. Jorge Gabriel Durant Broden, y mis jurados: presidente, Dr. Juan Mayhua Palomino, Primer miembro, Juan Poma, Segundo miembro, Ing. Edwar Flores Soncco, quienes me dieron invaluable consejos para mejorar esta investigación.

**Pedro Luis Chambi Chahuara**



# ÍNDICE GENERAL

Pág.

**DEDICATORIA**

**AGRADECIMIENTOS**

**ÍNDICE GENERAL**

**ÍNDICE DE TABLAS**

**ÍNDICE DE FIGURAS**

**ÍNDICE DE ANEXOS**

**ACRÓNIMOS**

**RESUMEN ..... 13**

**ABSTRACT..... 14**

## CAPÍTULO I

### INTRODUCCIÓN

#### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

**1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA ..... 15**

**1.2. PREGUNTAS DEL PROBLEMA ..... 17**

**1.3. HIPÓTESIS ..... 17**

1.3.1. Hipótesis general ..... 17

1.3.2. Hipótesis específicas ..... 18

**1.4. OBJETIVOS..... 18**

1.4.1. Objetivo general ..... 18

1.4.2. Objetivos específicos ..... 18

**1.5. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN..... 19**



## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

<b>2.1.</b>	<b>ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>23</b>
2.1.1.	Antecedentes internacionales .....	23
2.1.2.	Antecedentes nacionales .....	25
2.1.3.	Antecedentes locales .....	32
<b>2.2.</b>	<b>MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>36</b>
2.2.1.	Marco conceptual .....	36
2.2.2.	Marco metodológico .....	42

## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

<b>3.1.</b>	<b>UBICACIÓN DE ESTUDIO .....</b>	<b>45</b>
3.1.1.	Clima .....	46
3.1.2.	Accesibilidad.....	47
<b>3.2.</b>	<b>POBLACIÓN Y MUESTRA.....</b>	<b>47</b>
3.2.1.	Población.....	47
3.2.2.	Muestra.....	48
<b>3.3.</b>	<b>TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>49</b>
3.3.1.	Tipo de investigación .....	49
3.3.2.	Diseño de investigación .....	50
<b>3.4.</b>	<b>TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....</b>	<b>51</b>
3.4.1.	Técnicas.....	51
3.4.2.	Instrumentos .....	52
<b>3.5.</b>	<b>PRUEBA DE HIPÓTESIS .....</b>	<b>52</b>



## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

<b>4.1. RESULTADOS .....</b>	<b>54</b>
4.1.1. Objetivo específico 1: Velocidad del aire, temperatura y humedad relativa en las labores del NV 4185 San Germán .....	56
4.1.2. Objetivo específico 2: Evaluación de la efectividad de los sistemas de inyección de aire implementados en las operaciones subterráneas de la mina.....	61
4.1.3. Objetivo específico 3: Resultados obtenidos y comparados con las normas y las adecuadas prácticas de la industria minera.....	68
4.1.4. Prueba de hipótesis de investigación.....	71
<b>4.2. DISCUSIÓN .....</b>	<b>74</b>
<b>V. CONCLUSIONES.....</b>	<b>79</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>82</b>
<b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>84</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>88</b>

**ÁREA:** Ingeniería de Minas

**TEMA:** Diseño y planeamiento en Minería

**FECHA DE SUSTENTACIÓN:** 19 de diciembre del 2024





## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1</b> Coordenadas geográficas y coordenadas UTM .....	45
<b>Tabla 2</b> Población y muestra de investigación.....	49
<b>Tabla 3</b> Resultados de los promedios de la velocidad del aire en las labores del Nivel 4185 del proyecto San Germán antes y después de la implementación de la propuesta de mejora .....	56
<b>Tabla 4</b> Resultados de los promedios de la temperatura en las labores del Nivel 4185 del proyecto San Germán antes y después de la implementación de la propuesta de mejora .....	57
<b>Tabla 5</b> Resultados de los promedios de la humedad relativa en las Labores del Nivel 4185 del proyecto San Germán antes y después de la implementación de la propuesta de mejora .....	59
<b>Tabla 6</b> Comparación de la velocidad del aire, temperatura y humedad relativa en las labores del Nivel 4185 del proyecto San Germán antes y después de la implementación de la propuesta de mejora.....	61
<b>Tabla 7</b> Comparación de resultados con la normativa DS-024-2016-EM .....	69
<b>Tabla 8</b> Prueba de hipótesis de la velocidad del aire .....	72
<b>Tabla 9</b> Prueba de hipótesis de temperatura.....	72
<b>Tabla 10</b> Prueba de hipótesis de humedad .....	73



## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1</b> Esquema de instalación de ventiladores Nivel 4185 .....	65
<b>Figura 2</b> Plano del nuevo diseño de instalación de mangas de 40" .....	66
<b>Figura 3</b> Campana de datos (Curva normal) .....	73



## ÍNDICE DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
<b>ANEXO 1</b> Matriz de consistencia .....	88
<b>ANEXO 2</b> Base de datos .....	89
<b>ANEXO 3</b> Operacionalización de variables.....	90
<b>ANEXO 4</b> Evidencias fotográficas.....	91
<b>ANEXO 5</b> Ubicación geográfica de la U.M San Rafael. ....	99
<b>ANEXO 6</b> Plano de Ubicación de tramo del proyecto San Germán Nv 4185, U.M. San Rafael.....	100
<b>ANEXO 7</b> Ubicación de cámara pulmón y cámara de ventiladores y mangas .....	101
<b>ANEXO 8</b> Dirección de inyección de aire fresco .....	102
<b>ANEXO 9</b> Cámara de pulmón de ventiladores .....	103
<b>ANEXO 10</b> Proyecto de ampliación de cámara de ventiladores.....	104



## ACRÓNIMOS

ANFO	: <i>Ammonium Nitrate - Fuel Oil</i>
APA	: <i>American Psychological Association</i>
CFM	: <i>Cubic Feet per Minute</i>
CH <sub>4</sub>	: Metano
CO <sub>2</sub>	: Dióxido de Carbono
CO	: Monóxido de Carbono
DS	: Decreto Supremo
Cfm	: <i>Cubic Feet per Minute</i>
MINEM	: Ministerio de Energía y Minas
NV	: Nivel
UM	: Unidad Minera
VAN	: Valor Actual Neto
PV+BESS	: <i>Photovoltaic + Battery Energy Storage System</i>
VOD	: Ventilación Bajo Demanda
LHD	: <i>Load-Haul-Dump</i>
KM	: Kilómetros
Seg	: Segundos
m <sup>3</sup> /s	: Metros cúbicos por segundos
%	: Porcentaje
°	: Grados



## RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo determinar la eficiencia de un sistema de inyección de aire para el proyecto San Germán NV 4185, UM San Rafael, asegurando condiciones óptimas de velocidad del aire, temperatura y humedad. Se utilizó un enfoque cuantitativo con un diseño experimental. Se recopilaron datos en la mina para realizar un análisis detallado de estas variables, comparando los resultados mediante técnicas estadísticas con los estándares y prácticas. Los resultados indican que la implementación de un sistema de inyección de aire para el Proyecto San Germán NV 4185, UM San Rafael, mejora significativamente la velocidad del aire, la temperatura y la humedad, garantizando un ambiente óptimo, debido a la incorporación de ventiladores de mayor capacidad y la ampliación de la cámara de ventilación. Asimismo, el p-value del estadístico T de Student es 0.000 (velocidad del aire), 0.000 (temperatura) y 0.000 (humedad), que son valores menores que el nivel de significancia de 0.05. Además, se tiene el valor crítico de T tabla ( $T_t$ ): 1.8595 y los valores calculados de T obtenida ( $T_o$ ) son: velocidad del aire: 15.215; temperatura: 14.639; humedad: 40.315. Entonces, los valores calculados de T para la velocidad del aire, temperatura y humedad son significativamente mayores que el valor crítico de 1.8595. Se concluyó que antes de la intervención en el Proyecto San Germán NV 4185, U.M. San Rafael, las condiciones de velocidad del aire, temperatura y humedad relativa no cumplían con los estándares óptimos. Sin embargo, tras implementar un sistema de inyección de aire, se lograron mejoras significativas en estas variables.

**Palabras clave:** Eficiencia operativa, humedad relativa, inyección, temperatura, velocidad del aire.



## ABSTRACT

The objective of this research was to determine the efficiency of an air injection system for the San Germán Project NV 4185, UM San Rafael, ensuring optimal conditions of air velocity, temperature and humidity. A quantitative approach with an experimental design was used. Data were collected at the mine to perform a detailed analysis of these variables, comparing the results using statistical techniques with standards and practices. The analyses revealed that the implementation of an air injection system for the San Germán Project NV 4185, UM San Rafael, significantly improves air velocity, temperature and humidity, ensuring an optimal environment, due to the incorporation of larger capacity fans and the enlargement of the ventilation chamber. Likewise, the p-value of the Student's t-statistic is 0.000 (air velocity), 0.000 (temperature) and 0.000 (humidity), which are values lower than the significance level of 0.05. In addition, the critical value of T table ( $T_t$ ) is 1.8595 and the calculated values of T obtained ( $T_o$ ) are: air velocity: 15.215; temperature: 14.639; humidity: 40.315. Then, the calculated values of T for air velocity, temperature and humidity are significantly higher than the critical value of 1.8595. It was concluded that prior to the intervention at the San German Project NV 4185, San Rafael Mining Unit, the air velocity, temperature and relative humidity conditions did not meet the optimum standards. However, after implementing a ventilation system, significant improvements in these variables were achieved.

**Keywords:** Operating efficiency, relative humidity, injection, temperature, air velocity.



# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A nivel internacional, la ventilación adecuada en las operaciones subterráneas de las minas ha sido reconocida como un aspecto crítico para garantizar la salud y seguridad de los trabajadores, también para mantener condiciones óptimas de trabajo. Estudios previos han revelado que una ventilación insuficiente puede resultar en una mala calidad del aire, aumento de los riesgos para la salud y disminución de la eficiencia operativa. Según la Organización Internacional del Trabajo (2019) citado por (Díaz, 2019), aproximadamente el 40% de accidentes fatales en la minería ocurren en entornos subterráneos.

En el contexto nacional, en el Perú, la minería juega un rol relevante en la economía del país. No obstante, existen desafíos en relación con la seguridad y las condiciones laborales en las operaciones mineras subterráneas. Según el Ministerio de Energía y Minas (MINEM, 2019), se ha observado que la ventilación inadecuada es una de las causas predominantes de enfermedades ocupacionales y accidentes en la industria minera.

En el contexto local de la región Puno y la U.M. San Rafael, las evidencias muestran que esta mina es la principal productora de estaño en Sudamérica y contribuye significativamente al desarrollo económico de la región. Pero a pesar de operar con altos estándares ambientales, existe la necesidad de evaluar y mejorar los sistemas de ventilación utilizados en las operaciones subterráneas.



Estudios previos han demostrado que la deficiente ventilación en operaciones subterráneas puede deberse a diversas causas, como la obstrucción de los sistemas de ventilación debido a la acumulación de polvo o escombros, el diseño inadecuado de los sistemas de ventilación, la falta de mantenimiento adecuado y la inadecuada formación y capacitación de los trabajadores en relación con las prácticas de ventilación segura.

Las consecuencias de una ventilación deficiente en las operaciones subterráneas pueden ser graves. Además del riesgo para la salud debido a la exposición a sustancias tóxicas o peligrosas, la mala calidad del aire puede afectar negativamente la productividad, el bienestar emocional de los trabajadores y aumentar el riesgo de accidentes y enfermedades ocupacionales.

Como alternativas de solución, se han propuesto medidas como el diseño adecuado de sistemas de inyección de aire, la implementación de controles de ingeniería y técnicas de monitoreo avanzadas, la capacitación adecuada de los trabajadores en prácticas seguras de ventilación y el cumplimiento estricto de las regulaciones y estándares de seguridad.

Entonces, la deficiente ventilación en las operaciones subterráneas de la U.M. San Rafael, Puno, representa un problema relevante, con consecuencias que afectan la salud y seguridad de los trabajadores, así como la eficiencia operativa. La investigación y aplicación de soluciones adecuadas en términos de diseño, mantenimiento y capacitación son fundamentales para mejorar la calidad del aire y garantizar condiciones laborales seguras y saludables en esta mina subterránea.

Por lo expuesto se plantean las siguientes interrogantes:





## **1.2. PREGUNTAS DEL PROBLEMA**

### **1.2.1. Problema general**

¿Cuál es la efectividad del sistema de inyección de aire implementado en el proyecto San Germán NV 4185, U. M. San Rafael, para garantizar condiciones óptimas de velocidad de aire, temperatura y humedad?

### **1.2.2. Problemas específicos**

- ¿Cuáles son las condiciones iniciales de la velocidad del aire, la temperatura y la humedad relativa para el proyecto San Germán NV 4185, U.M. San Rafael?
- ¿Es efectiva la implementación de un sistema de inyección de aire en la mejora de la velocidad del aire y las condiciones de temperatura y humedad en las labores del proyecto San Germán NV 4185, U.M. San Rafael?
- ¿Cumplen los resultados obtenidos tras la implementación del sistema de inyección de aire para el proyecto San Germán NV 4185, U.M. San Rafael, con las normas y estándares establecidos por la industria minera?

## **1.3. HIPÓTESIS**

### **1.3.1. Hipótesis general**

La implementación de un sistema de inyección de aire para el Proyecto San Germán NV 4185, U.M. San Rafael, mejora significativamente la velocidad del aire, la temperatura y la humedad, garantizando un ambiente óptimo.



### **1.3.2. Hipótesis específicas**

- Las condiciones iniciales de la velocidad del aire, temperatura y humedad relativa para el proyecto San Germán NV 4185, U.M. San Rafael, no cumplen con los estándares óptimos antes de la intervención.
- La implementación de un sistema de inyección de aire es efectiva para mejorar la velocidad del aire y las condiciones de temperatura y humedad en las labores del Proyecto San Germán NV 4185, U.M. San Rafael.
- Los resultados obtenidos tras la implementación del sistema de inyección de aire para el proyecto San Germán NV 4185, U.M. San Rafael, cumplen con las normas y estándares establecidos por la industria minera.

## **1.4. OBJETIVOS**

### **1.4.1. Objetivo general**

Determinar la efectividad del sistema de inyección de aire para el proyecto San Germán NV 4185, U.M. San Rafael, para garantizar condiciones óptimas de velocidad del aire, temperatura y humedad relativa.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Evaluar las condiciones iniciales de la velocidad del aire, la temperatura y la humedad relativa en el proyecto NV 4185 San Germán, U.M. San Rafael.
- Evaluar la efectividad del sistema implementado de inyección de aire en la mejora de la velocidad del aire y la temperatura y la humedad relativa en las labores del Proyecto San Germán NV 4185, U.M. San Rafael.



- Verificar que los resultados obtenidos tras la implementación del sistema de inyección de aire para el proyecto San Germán NV 4185, U.M. San Rafael, cumplan con los estándares y normativas vigentes en la industria minera.

## **1.5. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.5.1. El porqué de la tesis**

La investigación se justifica porque las condiciones iniciales de velocidad del aire, temperatura y humedad en el proyecto San Germán NV 4185 no cumplían con los estándares óptimos. Esto generaba la necesidad de implementar un sistema de inyección de aire que mejore el ambiente laboral, garantizando la salud de los trabajadores y optimizando la eficiencia operativa. Además, las normativas de la industria minera exigen mantener estándares ambientales específicos, lo que refuerza la importancia de evaluar y asegurar el cumplimiento de estas regulaciones.

### **1.5.2. El para qué de la tesis**

La utilidad de esta investigación radica en evaluar las condiciones iniciales y los resultados obtenidos tras la implementación de un sistema de inyección de aire, estableciendo un marco de referencia claro sobre su efectividad. Asimismo, se busca generar información relevante sobre la relación entre una ventilación adecuada y la mejora de las condiciones laborales en el sector minero. Esto no solo beneficia futuras investigaciones y proyectos, sino que también contribuirá a la promoción de mejores prácticas en la industria.



Por otro lado, según Hernández-Sampieri y Mendoza (2018); la justificación se manifiesta a través de la relevancia social, práctica, teórica y metodológica.

En relación a la relevancia social, se refleja en su proyección científica (para ampliar el conocimiento en torno al problema) y social. La evaluación de los sistemas de ventilación en las operaciones subterráneas de la U.M. San Rafael tiene una relevancia social significativa. La mejora de la calidad del aire en la mina beneficia directamente a los trabajadores, proporcionándoles un ambiente de trabajo más saludable y seguro. Esto reduce los riesgos asociados a enfermedades respiratorias y otros problemas de salud relacionados con la exposición a contaminantes en el aire. Asimismo, al garantizar condiciones óptimas de ventilación, se contribuye a la prevención de accidentes y emergencias en la mina, protegiendo la integridad y la vida de los trabajadores. Estos beneficios sociales se extienden también a las comunidades cercanas a la mina, al reducir la contaminación ambiental y minimizar los impactos.

La mejora de la calidad del aire en la mina también beneficia a las comunidades vecinas, ya que se previene, controla y mitiga el material particulado que puede afectar su salud. Además, beneficia al medio ambiente, ya que se reduce la emisión de gases contaminantes que contribuyen al cambio climático. Por último, beneficia a la empresa minera, ya que se optimiza el uso de energía, se aumenta la productividad y se evitan sanciones legales por incumplir las normas ambientales.

La relevancia teórica radica en que se construye conocimientos según la realidad y resultados del contexto en cuanto a ambas variables de estudio



(Córdova, 2013). La evaluación de los sistemas de ventilación en operaciones subterráneas es un tema ampliamente estudiado en el ámbito de la ingeniería minera. Existen investigaciones y estudios que proporcionan fundamentos teóricos sólidos para comprender los principios y conceptos relacionados con la ventilación en minas subterráneas. Sin embargo, cada mina tiene características particulares que requieren una evaluación específica. La investigación propuesta contribuirá al cuerpo teórico existente al aplicar y adaptar los conocimientos teóricos en el contexto específico de la U.M. San Rafael, generando nuevos conocimientos y perspectivas.

Según Vara (2012), la evaluación de los sistemas de ventilación en la U.M. San Rafael tiene una gran relevancia práctica, ya que permite mejorar la gestión de la mina y garantizar la seguridad de los trabajadores.

La evaluación de los sistemas de ventilación en la U.M. San Rafael es de vital importancia práctica para la gestión de la mina y la seguridad de los trabajadores. Los resultados obtenidos de esta investigación proporcionarán información clave sobre la eficiencia y el rendimiento de los sistemas de ventilación existentes, identificando áreas de mejora y optimización. Esto permitirá a la empresa minera implementar mejoras concretas en los sistemas de ventilación, garantizando condiciones seguras y saludables para los trabajadores. Además, la investigación también puede ser utilizada como base para la toma de decisiones relacionadas con inversiones en infraestructura y tecnología de ventilación, maximizando la eficiencia y la efectividad de los recursos utilizados.

Para evaluar los sistemas de inyección de aire en las operaciones subterráneas de la U.M. San Rafael, se emplea un enfoque cuantitativo, de tipo



experimental, con un diseño prospectivo y analítico. Los datos se obtienen mediante la recopilación de información y se procesan mediante el análisis estadístico. Esta metodología permite obtener información precisa y confiable sobre la eficiencia y el rendimiento de los sistemas de ventilación, así como su capacidad para garantizar condiciones óptimas de calidad del aire. La aplicación de técnicas estadísticas apropiadas y la comparación con estándares y adecuadas prácticas garantizan la rigurosidad y la validez de los resultados obtenidos.



## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

##### 2.1.1. Antecedentes internacionales

Toro, (2022) en su estudio realizó una investigación con el objetivo de evaluar la incorporación de energía solar y ventilación *on-demand* (VOD) para reducir los costos eléctricos anuales de ventilación y las emisiones de gases de efecto invernadero en una mina subterránea explotada mediante el método de hundimiento de bloques. La metodología empleada fue de enfoque cuantitativo, tipo aplicado y diseño experimental. Se utiliza como técnica la simulación y el análisis económico-ambiental, haciendo uso de modelos de evaluación financiera y simuladores de flujo de aire como instrumentos. La muestra consistió en la evaluación de escenarios en una mina subterránea ficticia representativa del sector minero chileno. Se analizaron cuatro escenarios principales: una central fotovoltaica, una central fotovoltaica con acumulación por baterías (PV+BESS), ventilación bajo demanda (VOD), y una combinación de VOD con PV+BESS. Los resultados indicaron que los escenarios más viables fueron VOD+PV+BESS, que obtuvo un VAN de 51.2 MUSD, generó ahorros anuales de electricidad de 5.9 MUSD y redujo las emisiones en un 61 %; y VOD, que obtuvo un VAN de 49.4 MUSD y redujo las emisiones en un 37 %. Por otro lado, el escenario PV+BESS logró reducir las emisiones en un 53 %, pero resultó económicamente inviable con un VAN de -3.3 MUSD debido al alto costo de las baterías, que tendrían que reducirse en un 10 % para ser viables. Además, se evaluó la incorporación de LHD



eléctricos, observándose una reducción de emisiones en un 13 %. Sin embargo, desde una perspectiva económica, su implementación fue beneficiosa solo en escenarios sin sistema VOD. Como conclusión, los escenarios de ventilación bajo demanda y su combinación con sistemas fotovoltaicos representan soluciones óptimas desde el punto de vista económico y ambiental. No obstante, se desaconseja el uso de baterías en el corto plazo debido a su alto costo. Se recomienda priorizar los escenarios de VOD y VOD+PV+BESS para maximizar la eficiencia y sostenibilidad de las operaciones mineras.

Robles y Foladori, (2019) en su estudio, plantearon como metodología que el estudio se basa en una revisión de investigaciones y datos relacionados con la minería en México. Se recopiló y analizó información longitudinal sobre los periodos de desarrollo minero y se profundiza en el uso de la automatización en la industria minera en tiempos recientes. Se examinan factores como el desarrollo tecnológico, las políticas económicas y ambientales, y la inversión extranjera. El enfoque fue de revisión y análisis de datos actuales, el tipo de investigación fue una investigación exploratoria y explicativa. La técnica e instrumento de recolección de datos fueron la recopilación y análisis de información histórica, revisión bibliográfica, análisis de datos actuales sobre la implementación de tecnologías automatizadas. Se encontró como resultado: El estudio revela que la automatización de la minería en México ha experimentado un aumento significativo en los últimos años. Se observa una concentración del capital en grandes empresas, desplazando a la pequeña y mediana minería en el sector. La inversión extranjera directa en la minería ha tenido fluctuaciones importantes, pero se destaca el papel fundamental de la inversión en equipos por parte de las empresas mineras. Conclusión: Se concluye que la automatización de la minería





en México ha sido impulsada por el desarrollo tecnológico, los precios de los metales y las políticas gubernamentales. Se destaca la importancia de considerar el avance de la megaminería y las explotaciones a cielo abierto en el contexto del neoextractivismo. Se enfatiza la necesidad de comprender tanto los aspectos políticos y económicos como los avances tecnológicos en el análisis de la industria minera en México.

### **2.1.2. Antecedentes nacionales**

Earzo, (2024) en su investigación “Análisis de puesto de trabajo. Estudio y optimización del sistema de ventilación del complejo minero Farallón Negro” se planteó como objetivo optimizar el sistema de ventilación en la empresa minera Yacimientos Mineros Agua de Dionisio (YMAD) para mejorar la ventilación en las zonas de explotación Veta Encuentro y Veta Esperanza Sudeste, y evaluar los requisitos de ventilación para la profundización de Veta Encuentro. En la metodología se realizó un estudio del sector a través de planos y observaciones en campo para planificar las estaciones de medición. Se llevaron a cabo mediciones de flujos de aire y se calculó el caudal global requerido en función de datos de personal, equipos y explosivos. Se identificaron problemas en sectores específicos, instalando aforos de medición para evaluar la calidad y velocidad del aire. Se utilizó el software Ventsim Visual para simular los flujos de aire y analizar tres escenarios de caudales requeridos. En los resultados se identificaron problemas de recirculación y mala distribución de los flujos de aire. La simulación permitió verificar estos problemas y proponer cambios para optimizar el sistema de ventilación. Se concluye que el análisis y las simulaciones realizadas proporcionaron una visión clara de las deficiencias en el sistema de ventilación. Las recomendaciones y ajustes propuestos contribuirán a mejorar la eficiencia del



circuito de ventilación y abordar los problemas específicos en la mina, especialmente en la profundización de Veta Encuentro.

Abad (2023), en su investigación, planteó como objetivo evaluar el sistema de ventilación utilizado en mina para verificar su cumplimiento con la normativa vigente del DS-023-2017-EM y determinar la eficiencia de los caudales de ingreso y salida de aire en diferentes zonas de operación. En cuanto a la metodología, se analizaron los ingresos de aire fresco por las bocaminas de los niveles 821, 710 y 140. Se realizó un cálculo teórico del requerimiento de aire fresco y balance de flujo según el personal y equipos diésel utilizados. Además, se midieron los caudales de ingreso y salida de aire en las zonas alta y baja, y se inventariaron los equipos de ventilación mecánica, considerando su estado operativo. Se tuvo como resultado que el caudal de ingreso de aire: 136,610 cfm; caudal de salida: 136,219 cfm; diferencia: 391 cfm; cobertura de aire: 112,02 %. Se concluyó que el sistema de ventilación actual muestra un cumplimiento aceptable en términos de cobertura de aire en ambas zonas, aunque se identifican áreas de mejora, especialmente en la reparación y mantenimiento de los ventiladores para optimizar la distribución del flujo de aire y garantizar la seguridad ocupacional. en la mina.

Tejeda (2022), en su investigación, planteó como objetivo evaluar los resultados de las condiciones de ventilación de los flujos de ingreso y salida de aire para el sistema integral de ventilación en la unidad minera Yauricocha. Se utilizó el método científico, con un enfoque aplicado, nivel correlacional y diseño experimental. La población y muestra estuvieron conformadas por la mina Cachi Cachi de la unidad minera Yauricocha. La evaluación se centró en los flujos de entrada y salida de aire, analizando su influencia en la actualización del sistema de ventilación. El sistema de ventilación de la mina Yauricocha opera bajo un



circuito integral forzado, compuesto por rampas de acceso, chimeneas de ventilación y extracción del aire viciado mediante chimeneas escalonadas. Este sistema convencional/mecanizado ofrece alta resistencia y capacidad operativa al circuito de ventilación. La evaluación de las condiciones de ventilación permitió identificar que el circuito integral de la mina Yauricocha cumple con los requerimientos de ventilación al utilizar un sistema convencional/mecanizado que proporciona eficiencia y resistencia al flujo de aire, lo cual respalda la actualización del sistema integral. de ventilación.

Turpo y Samos, (2022) en su investigación, plantearon como metodología el análisis exhaustivo del sistema de ventilación existente, incluyendo cálculos de consumo de aire por personal, equipos y madera, así como la evaluación de la pérdida de caudal ocasionada por la fricción y los topes. Se llevan a cabo mediciones para determinar el caudal de aire de ingreso y salida del sistema de ventilación, y se realiza un análisis de las velocidades de aire en diferentes estaciones dentro de la mina. El enfoque fue de análisis de datos in situ (cuantitativo). El tipo de investigación fue aplicado. La muestra abarca 19 zonas de ventilación en la Mina MARSÁ. La técnica e instrumento de recolección de datos es de mediciones in situ, cálculos de consumo de aire. Se tuvo como resultado: según las mediciones realizadas, el caudal de aire de ingreso total al sistema de ventilación es de 571,236 CFM (pies cúbicos por minuto), mientras que el caudal de salida de aire viciado es de 693,777 CFM. Esto resulta en un balance de caudal del 17.66%.

Fernández, (2022) en su tesis titulada “Rediseño del Sistema de Ventilación, para su Optimización en Minería Subterránea Mecanizada”, establece como objetivo diseñar el sistema de ventilación de una mina, con el fin



de mejorar las condiciones del aire en el entorno laboral. La metodología empleada incluyó la evaluación de variables críticas como la circulación de aire limpio, la evacuación de aire viciado, y el análisis del caudal de aire disponible en comparación con el requerido, que se determinó en 475 m<sup>3</sup>/s, evidenciando un desbalance significativo con el caudal actual de 121 m<sup>3</sup>/s. Los resultados de la investigación revelaron que, tras evaluar los principales parámetros de ventilación, la mina contaba con una disponibilidad teórica de aire de 624,000 CFM en ventilación principal y 433,000 CFM en ventiladores secundarios. Se concluyó que la reubicación de los ventiladores actuales podría optimizar el sistema. Además, se diseñó un nuevo sistema de ventilación que consideraba la ventilación mecánica como principal y la ventilación natural como auxiliar, incluyendo la ejecución de chimeneas exclusivas y la redefinición de circuitos de aire. Finalmente, se concluyó que los parámetros de velocidad, temperatura y cobertura de aire en las labores se ajustaron para alcanzar condiciones óptimas de confort, lo que demuestra la necesidad de un diseño adecuado que garantice un ambiente seguro y eficiente en la minería subterránea.

Roque y Torres, (2021) en su investigación plantearon como metodología un enfoque de investigación fue cuantitativo. El tipo se clasificó como investigación aplicada. En cuanto al diseño, se empleó un diseño no experimental de tipo básico y descriptivo de sección transversal. La técnica de recolección de datos fue el análisis de literatura y observación como técnicas de recolección de datos. Los instrumentos fueron fichad de análisis de literatura y observación. El resultado revela que mostraron que un tiempo de compresión de aire de 2 minutos era suficiente para mantener la diferencia de presión y lograr una óptima entrega de recursos, con un costo total de 6,670,375 dólares. Por lo tanto, se recomendó



implementar un sistema de aire comprimido basado en las características del sistema identificadas, con una potencia de compresor de 86 kW y un costo de 0.25 dólares por kWh.

Quispe, (2021) en su investigación “Optimización del sistema de ventilación con el software Ventsim-Design en la zona Consuelo I - nivel 2296 de la Unidad Operativa Alpacay - CIA Minera Yanaquihua S.A.C.”, se planteó como objetivo optimizar el sistema de ventilación en la zona Consuelo I de la U.M. Alpacay para mejorar la distribución del aire fresco y reducir problemas operativos. En cuanto a la metodología la evaluación del sistema de ventilación existente, identificación de un déficit del 41% en el aire fresco, y rediseño con el software Ventsim-Design. Se separó el circuito único en dos circuitos independientes y se adquirieron nuevos ventiladores. En los resultados la mejora en la cobertura de aire fresco en un 9.20%, reducción del tiempo de ventilación a 1.8 horas y reactivación de las labores paralizadas. En Conclusión, la optimización del sistema de ventilación mejoró significativamente las condiciones operativas y laborales en la zona Consuelo I.

Loayza, (2021) en su investigación “Optimización del sistema de ventilación a corto plazo en la unidad operativa Pallancata – Ayacucho” se planteó como objetivo optimizar el sistema de ventilación a corto plazo en la Unidad Operativa Pallancata – Ayacucho para cubrir el 100% de los requerimientos de ventilación en una mina con problemas actuales de cobertura del 56%. En la metodología se utilizó el software Ventsim™ Design 5.1 para simular el sistema de ventilación existente y desarrollar soluciones a corto y mediano plazo. Se realizaron análisis para definir el tamaño y número de ventiladores, así como las ubicaciones óptimas de las chimeneas, evitando gastos innecesarios y mejorando



la eficiencia del sistema. En resultados se identificaron nuevas soluciones de ventilación que permiten mejorar la cobertura de ventilación y garantizar un sistema flexible y económico, con una cobertura proyectada del 100% de los requerimientos. Se concluye que la optimización del sistema de ventilación en la Unidad Operativa Pallancata a través de simulaciones y análisis adecuados permitirá mejorar significativamente la cobertura de ventilación y la eficiencia operativa, evitando gastos innecesarios y mejorando la seguridad en las profundizaciones y expansiones de la mina.

Alhuirca (2020), en su investigación “Estudio del sistema de ventilación para el control de agentes químicos y físicos, Pallancata – veta Pablo”, plantearon como objetivo evaluar la eficiencia del sistema de ventilación en la veta Pablo de la Unidad Operativa Pallancata, con el fin de determinar su cumplimiento con la normativa para la distribución de aire en mina y su capacidad de eliminación de agentes químicos y físicos generados por la voladura, acarreo de mineral y transporte. En cuanto a la metodología, se recopilaron datos en los diferentes niveles de explotación de la veta Pablo, midiendo concentraciones de gases nitrosos, monóxido de carbono, dióxido de carbono, oxígeno, polvo, temperatura y velocidad del aire. Los resultados indican que el circuito de ventilación actual de la veta Pablo no satisface el requerimiento de aire necesario para el control y eliminación de los agentes generados por las actividades mineras. Sin embargo, se planteó una mejora con el cambio de circuito y la culminación del RC 04 Pablo, lo que permitiría alcanzar el 102% de cobertura en los requerimientos de ventilación. Se tiene como conclusión que el sistema de ventilación de la veta Pablo requiere ser optimizado mediante la implementación del circuito propuesto,



lo que garantizaría una distribución adecuada de aire para controlar los agentes contaminantes derivados de las operaciones mineras.

López y García, (2019) en su investigación adoptaron como metodología llevar a cabo un estudio empírico sobre la calidad de aire en la industria minera en España. Utilizaron un enfoque cuantitativo y un diseño de investigación transversal. La muestra consistió en trabajadores de diferentes minas en distintas regiones de España. Se recopilaron datos a través de cuestionarios estandarizados y se analizaron utilizando técnicas estadísticas. Los resultados revelaron los principales riesgos laborales en la industria minera y proporcionaron información sobre las percepciones y actitudes de los trabajadores hacia la seguridad en el trabajo.

Córdoba y Molina, (2011) en su estudio plantearon como metodología que se basa en el análisis de la normativa legal vigente y en el análisis técnico de los elementos clave para la caracterización de los sistemas de ventilación en minas subterráneas. Se identifican y analizan aspectos como las velocidades de circulación del aire, los valores límites permisibles de gases generados en la explotación y los métodos de medición y caracterización de los ventiladores utilizados en las minas. El enfoque de investigación fue de revisión documental y análisis técnico, el tipo fue investigación descriptiva. La técnica e instrumento de recolección de datos fueron la revisión de normativa legal y especificaciones técnicas, análisis de documentos y reportes técnicos. El resultado indica que el estudio destaca la importancia de garantizar una adecuada ventilación en las minas subterráneas para asegurar el confort y la seguridad de las personas que trabajan en ellas. Se enfatiza la necesidad de realizar mediciones y seguimientos constantes de los caudales de aire, las temperaturas y las concentraciones de gases en el



ambiente minero. Además, se identifican errores comunes en la medición y caracterización de los ventiladores, resaltando la importancia de la calibración de los equipos de medida y la correcta ubicación de la cabeza del tubo de Pitot.

### **2.1.3. Antecedentes locales**

Mendoza, (2024) en su investigación “Evaluación del sistema de ventilación e incidencias en el control de riesgos de operaciones mineras, seguridad y salud ocupacional en la UM. Atacocha S.A.A- Nexa Resources.” Se planteo como objetivo mejorar la eficiencia del sistema de ventilación en la mina Atacocha para asegurar un ambiente de trabajo más seguro y eficiente. En cuanto a la metodología se priorizó la ejecución del Proyecto 01 para la optimización del sistema de ventilación, con una planificación detallada y supervisión técnica continua. Se instalaron portones de ventilación y se implementaron dispositivos para evitar la recirculación de aire. Además, se realizaron mediciones exhaustivas de la calidad del aire utilizando equipos especializados y se evitó el uso de sopladores ineficaces. En los resultados se logró una mejora en la eficiencia del sistema de ventilación, con una reducción significativa en los problemas de calidad del aire. Las medidas implementadas resultaron en un entorno de trabajo más seguro y eficiente. Se concluye que la correcta implementación del Proyecto 01, junto con las medidas técnicas adoptadas, optimizó significativamente la ventilación en la mina Atacocha, mejorando tanto la seguridad laboral como la eficiencia operativa.

Huamaní, (2020) en su investigación “Mejoramiento del sistema de ventilación subterránea de la mina Condor IV, minera el palacio del Cóndor S.A.C.” se planteó como objetivo mejorar el sistema de ventilación de la mina





Condor IV para diseñar un método eficiente que optimice la seguridad laboral, la producción y el estado ambiental de las labores mineras. En cuanto Metodología: Se realizó una evaluación detallada del sistema de ventilación actual mediante la toma de muestras de agentes contaminantes y mediciones de caudal de aire, temperatura, gases y polvo. La información recopilada se modeló con el software Ventsim 5.4 para identificar fallas y sugerir mejoras. Se calcularon el requerimiento total de aire y la resistencia equivalente de las galerías, y se realizaron simulaciones para probar diferentes escenarios. Se propuso la bifurcación de mangas de ventilación para aumentar el flujo de aire hacia los subniveles y tajos de producción. En el resultado se evidencio el nuevo diseño de ventilación, con ajustes en las mangas y la introducción de una tercera línea de aire, mejoró la cobertura del aire fresco, optimizó el flujo y la distribución del aire en la mina. Se concluye que las mejoras en el sistema de ventilación resultaron en una mayor seguridad laboral, incremento en la producción minera y un ambiente de trabajo más saludable en la mina Condor IV.

Zavaleta, (2023) en su investigación “Optimización del sistema de ventilación en la mina Sheridan Mining Explorations El Combe E.I.R.L. – Algamarca, 2023” se planteó como objetivo determinar el grado de mejora del sistema de ventilación al ser optimizado, específicamente para abordar la excesiva acumulación de gases en la mina Sheridan. La metodología utilizada fue experimental y descriptiva comparativa, enfocándose en la población de todas las labores de la mina, con especial atención a la Rampa Sheridan, el único acceso principal que conecta la bocamina con la zona más profunda de la mina, a lo largo de aproximadamente 350 metros. La investigación reveló que la mina, caracterizada por tener labores ciegas, inicialmente utilizaba un ventilador de



15,000 cfm (424.8 m<sup>3</sup>/min) instalado en la bocamina. Este sistema generaba recirculación de aire y tiempos prolongados en la evacuación de gases, lo que resultaba en la acumulación de estos en la rampa principal y en labores adyacentes. A través del levantamiento de datos de ventilación, se calculó que el requerimiento total de aire, considerando el personal, equipos y fugas, era de 14,531.3 cfm (411.5 m<sup>3</sup>/min). Para cubrir este requerimiento, se determinó que la ventilación natural, mediante la conexión de una chimenea a la superficie, era la opción más económica, aumentando el requerimiento de aire del 69% al 88%, lo que permitiría flujos continuos dentro de las labores. Además, se propuso utilizar ventilación auxiliar para canalizar flujos y evacuar gases de voladura, reduciendo el tiempo de evacuación de 1:48 a 0:51 horas (46.9%) y regulando los horarios de ingreso del personal. Como resultado, se concluyó que la optimización del sistema de ventilación logró una reducción significativa del 59.9% en la acumulación de gases en la mina Sheridan, evidenciando la efectividad de las medidas implementadas para mejorar la seguridad y eficiencia del ambiente laboral.

Cárdenas, (2020) en su investigación “Mejoramiento del sistema de ventilación de minas para suministrar aire limpio a las labores subterráneas” se planteó como objetivo analizar y optimizar la actividad de ventilación en el ciclo de minado para minimizar accidentes por gaseamiento, cumpliendo con las normativas de seguridad. En cuanto a la metodología se realizaron cálculos para satisfacer las necesidades de aire fresco en distintas áreas de la mina, evaluando las condiciones de ventilación según el Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería. Se utilizó software especializado (Ventsim y Vnet) para modelar y calibrar el sistema de ventilación, identificando posibles fallas y optimizando costos. En los resultados se mejoró el sistema de ventilación en la



mina, aumentando la eficiencia del trabajador y del equipo, minimizando el riesgo de exposición a gases nocivos mediante infraestructura adecuada y ventilación optimizada. El estudio concluye que el análisis y la optimización del sistema de ventilación, apoyados por modelos y software, reducen riesgos de accidentes y mejoran la eficiencia operativa, con aplicación efectiva en la minería subterránea.

Ramos, (2019) en su investigación “Desarrollo de chimeneas de ventilación, Ore pass y Waste pass utilizando el método de perforación Raise boring para la continuidad de labores mineras en la unidad San Rafael” se planteó como objetivo desarrollar chimeneas de ventilación, Ore pass y Waste pass mediante el uso de máquinas Raise Borer en la U.M. San Rafael. En cuanto a la metodología el proceso se llevó a cabo entre julio y septiembre de 2019, utilizando una máquina Raise Borer para perforar verticalmente con ángulos de 60° a 90°. El método comienza con la instalación de la máquina, la perforación de un agujero piloto, el acople de una cabeza rimadora, y finalmente la creación de la chimenea. En los resultados se lograron chimeneas de ventilación, ore pass y waste pass con diámetros de 8 a 10 pies y longitudes de 100 a 300 metros, dependiendo de las características de la máquina. Se concluye que el sistema Raise Borer es más ventajoso que los métodos convencionales, ya que permite una continuidad segura y eficiente de las operaciones mineras, además de ser respetuoso con el medio ambiente.

Wilberth, (2019) en su investigación “Ejecución de chimenea con el método raise boring para la optimización del sistema de ventilación en la U.M. San Rafael - Minsur – 2018” se planteó como objetivo construir chimeneas usando el método Raise Boring para optimizar el sistema de ventilación en la U.M. San Rafael-MINSUR, creando condiciones termo-ambientales adecuadas en la zona



de profundización del nivel 4200. En la metodología se usó implementación del método Raise Boring para la construcción de chimeneas, con el fin de mejorar la ventilación y las condiciones ambientales en la U.M. La investigación se centró en la aplicación de este método para evitar problemas de ventilación y mejorar el rendimiento del personal. En los resultados la ejecución de las chimeneas con el método Raise Boring resultó en una optimización efectiva del sistema de ventilación en el nivel 4200 de la U.M. San Rafael-MINSUR. Se concluye que a utilización del método Raise Boring permitió mejorar significativamente la ventilación y las condiciones termo-ambientales en la U.M., reduciendo paradas improductivas y mejorando el rendimiento del personal operativo.

## **2.2. MARCO TEÓRICO**

### **2.2.1. Marco conceptual**

El sistema de ventilación en minas a tajo cerrado es esencial para garantizar la seguridad, el bienestar de los trabajadores y la eficiencia operativa, asegurando una circulación continua de aire fresco, eliminando gases tóxicos, polvo y contaminantes (Castillo & Soto, 2022). Su diseño debe optimizar la distribución del aire, velocidad, volumen y calidad, cumpliendo con las normativas de seguridad. La eficiencia y el rendimiento dependen de la capacidad del sistema para minimizar pérdidas de presión y consumo energético, maximizando la extracción de contaminantes y el control de emisiones como metano y dióxido de carbono. Además, requiere un monitoreo constante de parámetros clave como presión, calidad del sistema de ventilación en una mina a tajo cerrado es fundamental para garantizar la seguridad y el bienestar de los trabajadores, así como la eficiencia operativa. Los sistemas de ventilación están



diseñados para proporcionar una circulación continua de aire fresco en todas las áreas de trabajo subterráneas y eliminar gases tóxicos, polvo y otros contaminantes. En minas a tajo cerrado, el desafío es asegurar una distribución eficiente del aire en áreas profundas y de difícil acceso, lo que exige un diseño adecuado y un monitoreo constante (Cárdenas, 2020).

#### **2.2.1.1. Eficiencia de los sistemas de ventilación**

La eficiencia de un sistema de ventilación en minería subterránea se refiere a la capacidad del sistema para suministrar aire fresco y eliminar los contaminantes de manera efectiva. Factores como el diseño del sistema, la distribución de los ductos y la capacidad de los ventiladores influyen directamente en la eficiencia del sistema. Un sistema eficiente asegura que las áreas de trabajo críticas reciban un flujo constante de aire, reduciendo el riesgo de acumulación de gases tóxicos como el metano y el dióxido de carbono, así como partículas de polvo que pueden ser perjudiciales para la salud de los trabajadores (Castillo & Soto, 2022).

#### **2.2.1.2. Rendimiento de los sistemas de ventilación**

El rendimiento de los sistemas de ventilación se refiere a la relación entre la energía consumida por los ventiladores y la cantidad de aire proporcionada a las áreas subterráneas. Un sistema de ventilación bien diseñado debe operar con un alto rendimiento, minimizando el consumo de energía mientras asegura una ventilación adecuada. Esto implica optimizar el tamaño de los ventiladores, la longitud de los conductos y el mantenimiento regular del equipo para evitar pérdidas innecesarias de presión (Cárdenas, 2020).



### **2.2.1.3. Mangas ignífugas en sistemas de ventilación minera**

Las mangas ignífugas son componentes importantes en los sistemas de ventilación minera, especialmente en operaciones subterráneas. Estas mangas, fabricadas con materiales resistentes al fuego, tienen como función principal canalizar el flujo de aire hacia zonas específicas, evitando la propagación de incendios en caso de chispas, explosiones o temperaturas elevadas (Cárdenas, 2020).

Las mangas ignífugas suelen estar elaboradas con tejidos resistentes a altas temperaturas, como el kevlar o materiales recubiertos con compuestos ignífugos. Estas características no solo garantizan su durabilidad, sino también la seguridad de los trabajadores (Castillo & Soto, 2022).

Las mangas permiten dirigir el aire limpio a zonas críticas de trabajo o áreas remotas, maximizando la eficiencia del sistema de ventilación. En el contexto del proyecto San Germán NV 4185, las mangas ignífugas desempeñan un papel crucial al garantizar que el flujo de aire se mantenga controlado y seguro, especialmente en áreas donde se manejan explosivos o equipos de combustión interna (Cárdenas, 2020).

### **2.2.1.4. Inyecciones de aire en minería subterránea**

Las inyecciones de aire son una técnica utilizada en minería subterránea para mejorar la distribución y calidad del aire en las labores. Este método consiste en introducir aire fresco a través de ductos o mangas, presurizando ciertas áreas para desplazar el aire contaminado y garantizar condiciones adecuadas para los trabajadores (Castillo & Soto, 2022).



Las inyecciones de aire se logran mediante ventiladores auxiliares o ventiladores principales conectados a mangas o conductos de ventilación. Esto permite redirigir el flujo hacia zonas específicas donde las concentraciones de gases o partículas tóxicas son más altas.

Las inyecciones de aire mejoran la calidad del aire en zonas profundas o de difícil acceso. Asimismo, reducen concentraciones de gases peligrosos como el monóxido de carbono (CO) o el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>). También regulan la temperatura y la humedad en las labores (Cárdenas, 2020).

Las inyecciones de aire son particularmente útiles cuando los trabajos mineros se extienden a mayor profundidad o distancia, donde la ventilación natural o el retorno no son suficientes para evacuar los contaminantes.

#### **2.2.1.5. Distribución del aire**

La distribución del aire en una mina subterránea es un aspecto crítico del sistema de ventilación. El diseño debe asegurar que el aire fresco llegue a todas las áreas de trabajo y que los contaminantes sean extraídos eficientemente. Una distribución desigual del aire puede resultar en áreas con ventilación insuficiente, aumentando el riesgo de accidentes o condiciones peligrosas. Por lo tanto, el diseño de los ductos y las rutas de ventilación debe ser cuidadosamente planificado para garantizar una circulación óptima del aire (Cárdenas, 2020).



#### **2.2.1.6. Velocidad de inyección de aire**

La velocidad del aire en los sistemas de inyección de aire en minas subterráneas juega un papel clave en la eliminación de gases y contaminantes. Según las normativas de seguridad, se deben mantener velocidades mínimas de ventilación para evitar la acumulación de gases peligrosos y partículas en suspensión. La velocidad del aire debe ser lo suficientemente alta como para arrastrar los contaminantes hacia los sistemas de extracción, pero no tan alta que provoque incomodidad a los trabajadores o desgaste prematuro del equipo (Cárdenas, 2020).

#### **2.2.1.7. Volumen de inyección de aire**

El volumen de inyección de aire se refiere a la cantidad total de aire fresco suministrado por el sistema de ventilación. Este parámetro está directamente relacionado con la eficiencia y rendimiento del sistema. El volumen de aire necesario en una mina subterránea depende de varios factores, como el tamaño de las áreas de trabajo, la cantidad de maquinaria utilizada y el número de trabajadores presentes. La capacidad para mantener un volumen adecuado de aire limpio es crucial para la seguridad y la operación continua de la mina (Castillo & Soto, 2022).

#### **2.2.1.8. Leyes promedio de cabeza**

En el contexto de la ventilación minera, las leyes promedio de cabeza se refieren a la variación de la presión del aire a lo largo del sistema de ventilación. La pérdida de presión en los ductos puede afectar significativamente la eficiencia de la ventilación, ya que reduce la capacidad del sistema para suministrar aire fresco de manera eficiente. Las





leyes promedio de cabeza son un parámetro clave en el diseño de los sistemas de ventilación, ya que influyen en la selección del tipo de ventilador y en la distribución de los ductos (Castillo & Soto, 2022).

#### **2.2.1.9. Niveles de emisiones**

Los niveles de emisiones en una mina subterránea incluyen la concentración de gases como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el monóxido de carbono (CO), el metano (CH<sub>4</sub>) y otras sustancias tóxicas generadas por la actividad minera y el uso de maquinaria. Mantener los niveles de emisiones dentro de los límites permitidos es esencial para la seguridad de los trabajadores. Los sistemas de ventilación deben estar diseñados para capturar y eliminar estas emisiones de manera efectiva, minimizando el riesgo de acumulación peligrosa de gases (Castillo & Soto, 2022).

#### **2.2.1.10. Calidad del aire**

La calidad del aire en una mina a tajo cerrado depende de la eficiencia del sistema de ventilación y del control de contaminantes. Para garantizar un ambiente de trabajo seguro, es fundamental mantener niveles adecuados de oxígeno y eliminar gases tóxicos y polvo en suspensión. Los sistemas de ventilación deben estar equipados con mecanismos que monitoreen constantemente la calidad del aire y ajusten el flujo de aire según las necesidades operativas y las condiciones ambientales en las áreas subterráneas. Una buena calidad del aire no solo protege la salud de los trabajadores, sino que también mejora la productividad al reducir el tiempo de inactividad relacionado con condiciones insalubres (Castillo & Soto, 2022).



## 2.2.2. Marco metodológico

### 2.2.2.1. Cálculo de velocidad del aire

La velocidad del aire es una de las variables fundamentales en la ventilación minera, ya que permite evaluar el flujo de aire que circula por los trabajos subterráneos.

- Instrumento de medición: Se utiliza un anemómetro para registrar la velocidad del aire en diferentes puntos del sistema de ventilación.
- Fórmula de cálculo:

$$Q = A \cdot V$$

Dónde:

- Q: Caudal de aire (m<sup>3</sup>/seg.)
- A: Área de la sección transversal del conducto o galería (m<sup>2</sup>)
- V: Velocidad del aire (m/min).

**Cálculo de la velocidad:**

$$V = Q/A$$

**Procedimiento:**

- Medición la sección transversal (A) de la galería o conducto.
- Determinación del caudal (Q) utilizando un anemómetro en puntos estratégicos.



- Cálculo de la velocidad promedio con los datos obtenidos.

#### 2.2.2.2. Cálculo de Temperatura

La temperatura en los trabajos subterráneos se mide para garantizar condiciones térmicas adecuadas para los trabajadores y el funcionamiento de equipos.

- **Instrumento de medición:** Se emplea un termómetro digital o infrarrojo para registrar las temperaturas en diferentes puntos.
- **Ecuación de equilibrio térmico:** La temperatura ambiente subterráneo está influenciada por factores como el calor geotérmico, la ventilación y las máquinas. En sistemas complejos, se puede usar la ecuación:

$$y_o = \frac{Q_{yo}}{\text{metro} \cdot \text{dopag}} + y_{o0}$$

Dónde:

- $y_o$ : Temperatura final (°do).
- $Q_{yo}$ : Calor generado por las fuentes (Yo).
- $\text{metrome}$ : Masa del aire (kg).
- $\text{dopag}$ : Capacidad calorífica específica del aire (J/(kg·K)).
- $y_{o0}$ : Temperatura inicial (°do).

#### Procedimiento:

- Registrar la temperatura inicial ( $y_{o0}$ ).



- Determinar las fuentes de calor (Q<sub>yo</sub>).
- Calcule la temperatura esperada tras el equilibrio térmico usando la fórmula.

### 2.2.2.3. Humedad relativa

La humedad relativa mide el porcentaje de vapor de agua presente en el aire respecto al máximo que puede contener a una temperatura específica.

- **Instrumento de medición:** Se utiliza un higrómetro o termohigrómetro digital.
- **Cálculo de humedad relativa:**

$$H R = \frac{PAGen}{PAGcontra} \cdot 100$$

Dónde:

- H R: Humedad relativa (%).
- PAGen: Presión parcial del vapor de agua (P a).
- PAGcontra: Presión de saturación del vapor de agua (P a).

## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. UBICACIÓN DE ESTUDIO

La presente investigación se realizó en la Región Puno, en la U.M. San Rafael, ubicada en el distrito de Antauta, Provincia de Melgar, Región de Puno, Perú. Las coordenadas geográficas de la mina son 15°53'38.7"S de latitud y 70°07'04.3"W de longitud. La altitud de la mina oscila entre los 4500 y 5000 msnm.

La U.M. San Rafael es reconocida como el tercer mayor productor mundial de estaño, contribuyendo actualmente con aproximadamente el 12% de la producción mundial de este metal.

**Tabla 1**

*Coordenadas geográficas y coordenadas UTM*

Ubicación	Valor
<b>Coordenadas geográficas</b>	
Longitud Oeste	70° 19'
Latitud Sur	14° 14'
<b>Coordenadas UTM</b>	
Este	357730
Norte	8426520

Nota: Información extraída de MINSUR (2022)



### 3.1.1. Clima

El clima es frígido todo el año. Tiene un ecosistema típico de gran altitud, con la mayoría de las áreas cubiertas de pastos naturales. El asentamiento más cercano es el distrito de Antauta, a 4 km de distancia. El agua se encuentra en las montañas cubiertas de nieve en pequeñas lagunas glaciares y en el río Antauta, cuenca y principal afluente del río Carabaya (Wilberth, 2019).

Este macizo tiene una forma semicircular con una cima escarpada y un fondo ondulado. El drenaje es radial, con procesos fluvioglaciares que dejan lagunas y morrenas escalonadas. La lutita y la cuarcita de la Formación Sandia del Ordovícico Superior comprenden dos depósitos de monzogranito. 24 y 27 millones de rocas peraluminosas del Oligoceno Superior-Mioceno Inferior. Rocas del Paleozoico Superior afloran en las cercanías de la mina.

Los yacimientos de San Rafael se encuentran en un sistema de vetas de fisuras sinistral izquierda alojadas en monzogranitos. Estos yacimientos están bajo empuje dilatacional donde la falla de San Rafael diverge o permanece hacia el oeste, con estas curvas que se desarrollan hacia la izquierda que conducen a problemas de compatibilidad crecientes y desplazamiento durante la falla, creando espacios abiertos y fracturando extensiones rellenas de mineral (vetas, brechas, stockwork).

En la veta San Rafael existe una zonificación vertical marcada, Cu en la parte superior del nivel de 4.700 msnm sobre Cu-Sn entre los niveles de 4.700 msnm y 4.533 msnm, por debajo del nivel de 4.533 msnm hay un aumento en la profundidad de Sn, en una diferencia en el nivel de 680 m.



### 3.1.2. Accesibilidad

Los siguientes accesos están disponibles:

- Existen tres rutas por las carreteras Lima – Arequipa (1.000 km), Arequipa – Juliaca (280 km) y desde la ciudad de Juliaca:
  - Pucara – Asillo – San Rafael.
  - Azángaro – San Rafael.
  - Juliaca – Ayaviri – Santa Rosa – Ñuñoa – San Rafael, a unos (180 km).
- Se accede por tren desde el puerto de Matarani, pasando por Arequipa y Juliaca hasta el poblado de Tirapata. La ruta continúa hasta el Cusco. Desde Tirapata se toma la vía hacia Asillo y San Rafael.
- Por avión, existe un aeropuerto comercial en la ciudad de Juliaca (Manco Cápac) y una pista de aterrizaje en San Rafael, debidamente equipados, a una altitud de 4,350 metros sobre el nivel del mar, a 25 minutos de vuelo desde Juliaca y vuelo directo de Lima a San Rafael, aproximadamente 2 horas.

## 3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA

### 3.2.1. Población

La población de esta investigación está constituida por el conjunto total de “labores de preparación” en San Germán, es decir, aquellas áreas específicas de trabajo subterráneo destinadas a la excavación y disposición de estructuras de acceso, como rampas, galerías y bypasses (MINSUR, 2022). Estas áreas son muy importantes para la operación minera, ya que facilitan el transporte de personal, materiales y aire hacia las distintas secciones de la mina.



En San Germán, la población abarca 25 labores de preparación, distribuidas en diferentes niveles y sectores. En 16 labores se usan ANFO y en las otras 9 no se usan.

### **3.2.2. Muestra**

La muestra seleccionada para este estudio está compuesta por 3 labores de preparación dentro del proyecto San Germán. Esta selección representa la tercera parte del total de las labores sin ANFO (3 de 9). Es decir, en la presente investigación, en ninguna de las tres labores se utiliza ANFO (*Ammonium Nitrate - Fuel Oil*).

La decisión de trabajar con esta muestra específica se fundamenta en que las labores seleccionadas corresponden a un nivel que tiene problemas en la optimización de los sistemas de ventilación, por lo que las condiciones de distribución y calidad del aire no cumplen con los estándares de seguridad. Entonces esta selección fue producto de la toma de decisiones y del contexto (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018).

#### **3.2.2.1. Muestreo**

El muestreo utilizado en esta investigación es de tipo no probabilístico o dirigido, es decir, la selección de los elementos de la muestra se realiza en función de criterios específicos del contexto y la toma de decisiones, en lugar del azar (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018). En este caso, los criterios utilizados son la deficiencia en ventilación y la reciente excavación.



El muestreo no probabilístico es adecuado para esta investigación, ya que permite focalizarse en áreas con condiciones específicas de ventilación que pueden no estar presentes en el resto de las labores de preparación. La selección dirigida de estas áreas asegura que el estudio se centre en los sectores más críticos, con el objetivo de mejorar los sistemas de ventilación en condiciones que presentan mayores desafíos para la salud y seguridad ocupacional.

**Tabla 2**

*Población y muestra de investigación*

<b>Característica</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
<b>Población Total</b>	25	100%
<b>Muestra</b>	3	12%
<b>Tipo de Muestreo</b>	No probabilístico o Dirigido	

Nota: Información extraída de MINSUR (2022)

### 3.3. TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

#### 3.3.1. Tipo de investigación

El tipo de investigación fue experimental, debido a que se manipulan directamente las variables o condiciones del entorno de estudio, es decir hubo un antes y un después de la intervención. Se recopilaron datos de la experimentación. En el contexto de la evaluación de los sistemas de inyección de aire en las operaciones subterráneas de la U.M. San Rafael, esto implica que no se realizaron modificaciones en los sistemas de ventilación con el propósito de recopilar datos posteriores. De esta manera, se recogieron datos de campo y se analizaron



estadísticamente para evaluar la eficiencia y el rendimiento de los sistemas de ventilación existentes.

Al respecto, Supo (2019), señala que en una investigación de tipo experimental existe intervención, control y manipulación de una o más variables.

La recopilación de datos se llevó a cabo a través de diversas fuentes, como registros y reportes existentes en la U.M. San Rafael, mediciones directas de la velocidad del aire, temperatura y humedad en las labores, así como la recolección de muestras para analizar los niveles de calidad del aire. Estos datos fueron sometidos a un análisis estadístico utilizando técnicas apropiadas, como pruebas de hipótesis, análisis de varianza y comparaciones de promedios.

La comparación de los resultados obtenidos con los estándares y las adecuadas prácticas de la industria permitió evaluar la eficiencia y el rendimiento de los sistemas de ventilación en la U.M. San Rafael. Esto proporcionó una base sólida para identificar áreas de mejora y optimización en los sistemas de ventilación, así como para evaluar su capacidad de respuesta ante situaciones de emergencia.

### **3.3.2. Diseño de investigación**

El diseño fue experimental y analítico, se refiere a la forma en que se examinan y descomponen los diferentes componentes de los sistemas de inyección de aire para su evaluación. En este contexto, implica que se realizó un análisis detallado y sistemático de los distintos elementos que conforman los sistemas de inyección de aire, como la velocidad del aire, la temperatura y humedad, así como la efectividad en la extracción y el control de contaminantes. Esto permitió



comprender y evaluar en profundidad el funcionamiento de los sistemas de ventilación y su capacidad para garantizar condiciones óptimas de calidad del aire.

Según Supo (2013), los diseños de investigación son estrategias metodológicas y estadísticas utilizadas para alcanzar los objetivos de investigación. Estos diseños se clasifican en categorías en función del campo de conocimiento al que pertenecen y en el cual se aplica la investigación.

Es importante destacar que los diseños de investigación no son estructuras fijas y rígidas, sino que pueden adaptarse a circunstancias particulares. Por lo tanto, los diseños son flexibles y pueden variar en gran medida. Se podría decir que los diseños de investigación son infinitos, ya que se pueden ajustar y modificar según las necesidades y características específicas de cada estudio.

En este sentido, los diseños de investigación representan un plan o un mapa que guía el desarrollo del estudio. Pueden ser comparados con un plano arquitectónico que, a lo largo de la ejecución, puede ser moldeado y modificado. No se trata de una “receta” inmutable y estática, sino más bien de un conjunto de características y elementos propios de la finalidad cognitiva y del propósito de la investigación, ya sea de naturaleza estadística o exegética.

### **3.4. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS**

#### **3.4.1. Técnicas**

- a) La observación directa antes y después de la intervención: en las áreas de trabajo subterráneas para recopilar datos sobre la distribución del aire, la velocidad y el volumen de ventilación, así como para evaluar



la efectividad de los sistemas de extracción y control de contaminantes.

- b) Registro de datos: El registro de datos es una técnica que utilizó herramientas mecánicas de medición como dispositivos de registro de datos, como *dataloggers*, para recopilar información sobre la temperatura, la humedad y otros parámetros relevantes en diferentes áreas de trabajo de la mina. Estos registros pueden proporcionar datos objetivos y precisos para el análisis posterior.
- c) Revisión documental: Se revisaron documentos y registros existentes en la mina, como informes de inspección, registros de incidentes o informes de monitoreo ambiental, para obtener información relevante sobre la ventilación y sus efectos en la calidad del aire.

#### **3.4.2. Instrumentos**

Se utilizaron los siguientes instrumentos:

- a) Ficha de observación directa (base de datos en excel): para registrar los principales datos de distribución del aire, la velocidad y el volumen de ventilación.
- b) Equipos de medición de velocidad de aire, temperatura, humedad y otros parámetros. Ejemplo: *dataloggers*.

### **3.5. PRUEBA DE HIPÓTESIS**

Para la prueba de hipótesis en esta investigación, se utilizó la prueba T de *Student* con el fin de determinar si la implementación del sistema de inyección de aire en el



proyecto San Germán NV 4185 ha mejorado significativamente las condiciones ambientales en términos de velocidad del aire, temperatura y humedad en las labores mineras.

La prueba T de *Student* es adecuada para esta investigación, ya que se compara el promedio de una muestra antes y después de la implementación del sistema de ventilación en un mismo entorno (condiciones previas vs. condiciones tras la implementación).

Esta prueba evalúa si los cambios observados en los promedios de las variables (velocidad del aire, temperatura y humedad) son significativos y no producto del azar.



## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. RESULTADOS

Los resultados de la investigación corresponden al tipo experimental, dado que se estableció un estado inicial antes de la intervención y un estado posterior a la implementación de la propuesta de mejora, con el objetivo de evaluar la optimización del sistema de inyección de aire. Esto indica que se trata de una investigación experimental en el proyecto San Germán NV 4185, U.M. San Rafael.

En este capítulo, se presentan los resultados obtenidos del análisis de datos de manera clara y estructurada, a través de resultados descriptivos comparativos entre el estado previo y el posterior. Además, se incluyen resultados inferenciales mediante la aplicación de un diseño estadístico o modelo matemático, que permitió comprobar las hipótesis de investigación con el fin de demostrar la efectividad del sistema de inyección de aire para el proyecto San Germán NV 4185, U.M. San Rafael.

Luego, se desarrolló la discusión, que consiste en interpretar los resultados obtenidos en relación con los objetivos de la investigación y compararlos con estudios previos.

Para facilitar la interpretación de los resultados, se detallan a continuación las características de la ubicación. (ver anexo 7).

Antes de la intervención experimental en el nivel 4185 de la U.M. San Rafael se contaba con un sistema de inyección de aire ineficiente que presentaba problemas significativos para mantener condiciones adecuadas. El sistema existente se basaba en



tres ventiladores de 74,000 cfm conectados en serie, que impulsaban el aire fresco a través de dos líneas de mangas de 40 pulgadas de diámetro hacia una cámara pulmón. Desde esta cámara, dos ventiladores secundarios de 30,000 cfm cada uno distribuían el aire a los frentes de trabajo en paralelo. Sin embargo, esta distribución no era suficiente para satisfacer las necesidades de ventilación, especialmente en términos de eliminación de gases tóxicos.

Las deficiencias del sistema resultaban en la acumulación de gases peligrosos, como monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), y dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>). Además, el nivel de oxígeno en algunas áreas podía no estar dentro del rango seguro, y la alta humedad, de entre 75% y 90%, exacerbaba los problemas de corrosión de los equipos y disminuía la seguridad.

#### 4.1.1. Objetivo específico 1: Velocidad del aire, temperatura y humedad relativa en las labores del NV 4185 San Germán

##### 4.1.1.1. Velocidad del aire

**Tabla 3**

*Resultados de los promedios de la velocidad del aire en las labores del Nivel 4185 del proyecto San Germán antes y después de la implementación de la propuesta de mejora*

<b>Parámetro estadístico</b>	<b>Antes de la Propuesta (m/min)</b>	<b>Después de la propuesta (m/min)</b>	<b>Cambio (%)</b>
<b>Labor 1</b>			
Promedio	17.9	30.6	+71,2%
Desviación estándar	1.2	3.1	+158,3%
Mínimo	16	27	+68,8%
Máximo	20	36	+80,0%
<b>Labor 2</b>			
Promedio	18.1	29.2	+61,3%
Desviación estándar	1.1	1.4	+27,3%
Mínimo	17	27	+58,8%
Máximo	20	31	+55,0%
<b>Labor 3</b>			
Promedio	18.2	30.3	+66,5%
Desviación estándar	1.6	2.2	+37,5%
Mínimo	16	26	+62,5%
Máximo	21	33	+57,1%

Nota: Información extraída de la base de datos.

Según la tabla 3, después de la implementación de la propuesta, se observa un aumento significativo en la velocidad del aire en las tres labores. Esto es indicativo de una mejora en la ventilación, lo cual es favorable para mantener un ambiente de trabajo seguro y libre de contaminantes en minería subterránea. Este incremento se acerca a los estándares recomendados en la industria minera.

En lo concerniente a la velocidad del aire en la Labor 1, el valor mínimo de la velocidad del aire aumentó de 16 m/min a 27 m/min (+68.8%), y el máximo de 20 m/min



a 36 m/min (+80.0%). Este incremento implica una mejor ventilación en la mina, que puede ayudar a diluir gases y mejorar la calidad del aire para los trabajadores. En la Labor 2, el mínimo pasó de 17 m/min a 27 m/min (+58.8%) y el máximo de 20 m/min a 31 m/min (+55.0%). Aunque el incremento es menor en comparación con la Labor 1, también representa una mejora significativa en el flujo de aire. En la Labor 3, el valor mínimo se incrementó de 16 m/min a 26 m/min (+62.5%) y el máximo de 21 m/min a 33 m/min (+57.1%). Los cambios también demuestran una mejora en la ventilación.

#### 4.1.1.2. Temperatura

**Tabla 4**

*Resultados de los promedios de la temperatura en las labores del Nivel 4185 del proyecto San Germán antes y después de la implementación de la propuesta de mejora*

Parámetro estadístico	Antes de la Propuesta (°C)	Después de la propuesta (°C)	Cambio (%)
<b>Labor 1</b>			
Promedio	28.7	20.1	-30,0%
Desviación estándar	1.4	2.0	+42,9%
Mínimo	27	17	-37,0%
Máximo	31	23	-25,8%
<b>Labor 2</b>			
Promedio	28.9	21.3	-26,3%
Desviación estándar	1.1	2.1	+90,9%
Mínimo	27	19	-29,6%
Máximo	30	24	-20,0%
<b>Labor 3</b>			
Promedio	29.2	21.1	-27,7%
Desviación estándar	1.4	1.9	+35,7%
Mínimo	27	18	-33,3%
Máximo	31	24	-22,6%

Nota: Información extraída de la base de datos.

Según la tabla 4, la reducción en la temperatura promedio después de la propuesta es notable, con una disminución de aproximadamente 30%



en la Labor 1, 26% en la Labor 2 y 28% en la Labor 3. Estas temperaturas más bajas son ventajosas, ya que reduce la probabilidad de estrés térmico para los trabajadores, alineándose con las prácticas de seguridad de la industria minera.

Los valores de temperatura en todas las labores disminuyeron después de la propuesta, lo cual es positivo en un ambiente minero, ya que temperaturas más bajas contribuyen a un ambiente de trabajo más confortable y seguro. En detalle, la Labor 1 mostró la disminución más significativa, con una reducción de la temperatura mínima de 27 °C a 17 °C, equivalente a un 37.0%, mientras que la temperatura máxima pasó de 31 °C a 23 °C (- 25,8%). Estos valores representan un avance importante en términos de confort térmico, ayudando a prevenir golpes de calor y otras afecciones. En la Labor 2, las temperaturas también experimentaron una mejora considerable. La temperatura mínima descendió de 27 °C a 19 °C, lo que equivale a una disminución del 29,6%, mientras que la máxima bajó de 30 °C a 24 °C, reduciéndose un 20,0%. Este comportamiento indica una mejora significativa en la eficiencia del sistema de inyección de aire o refrigeración implementado. Finalmente, la Labor 3 presentó reducciones: la temperatura mínima se redujo de 27 °C a 18 °C (-33.3%), mientras que la máxima pasó de 31 °C a 24 °C (-22.6%). Estas disminuciones confirman la efectividad de las estrategias propuestas para mejorar las condiciones térmicas.

#### 4.1.1.3. Humedad relativa

**Tabla 5**

*Resultados de los promedios de la humedad relativa en las Labores del Nivel 4185 del proyecto San Germán antes y después de la implementación de la propuesta de mejora*

<b>Parámetro estadístico</b>	<b>Antes de la Propuesta (%)</b>	<b>Después de la Propuesta (%)</b>	<b>Cambio (%)</b>
<b>Labor 1</b>			
Promedio	79,9	56,2	-29,7%
Desviación estándar	2,0	0,7	-65,0%
Mínimo	78	55	-29,5%
Máximo	84	57	-32,1%
<b>Labor 2</b>			
Promedio	78,2	56,1	-28,3%
Desviación estándar	2,3	0,8	-65,2%
Mínimo	75	55	-26,7%
Máximo	81	57	-29,6%
<b>Labor 3</b>			
Promedio	79,3	56,4	-28,9%
Desviación estándar	2,0	0,5	-75,0%
Mínimo	75	56	-25,3%
Máximo	82	57	-30,5%

Nota: Información extraída de la base de datos.

Según la tabla 5, la disminución en los niveles de humedad en todos los trabajos después de la propuesta refleja una mejora significativa en la ventilación y en el control de la humedad. Esto es beneficioso para la salud y la comodidad de los trabajadores, y ayuda a prevenir problemas relacionados con la alta humedad, como el deterioro de los equipos y el crecimiento de microorganismos.



La implementación del sistema de inyección de aire tuvo un impacto positivo en la reducción de la humedad relativa en todas las labores evaluadas. En entornos mineros, los altos niveles de humedad pueden intensificar la sensación de incomodidad y aumentar la fatiga, lo que hace especialmente relevante esta mejora.

En la Labor 1, la humedad mínima disminuyó significativamente de un 78% a un 55%, lo que equivale a una reducción del 29.5%, mientras que la humedad máxima pasó de 84% a 57%, con una disminución del 32.1%. Este cambio no solo crea un ambiente más seco, sino que también mejora la percepción térmica y la comodidad general en el trabajo.

En la Labor 2, se observará un patrón similar, con la humedad mínima reduciéndose de un 75% a un 55%, lo que representa una disminución del 26.7%. La humedad máxima bajó de 81% a 57%, logrando una reducción del 29.6%. Esta mejora indica que las condiciones de ventilación implementadas son efectivas para manejar la humedad en este entorno específico.

En la Labor 3, la humedad mínima se redujo de 75% a 56%, un descenso del 25.3%, mientras que la humedad máxima disminuyó de 82% a 57%, equivalente a una reducción del 30.5%. Estos resultados evidencian una mejora notable en la gestión de humedad relativa, generando un ambiente más seco y menos propenso a problemas asociados a la humedad excesiva.

#### 4.1.2. Objetivo específico 2: Evaluación de la efectividad de los sistemas de inyección de aire implementados en las operaciones subterráneas de la mina

Con la implementación de la propuesta de mejora, se logró incrementar la Velocidad del aire (m/min) en un +65,7%, la Temperatura (°C) disminuyó en un -27,7% y la Humedad (%) se redujo en un -28,8%.

**Tabla 6**

*Comparación de la velocidad del aire, temperatura y humedad relativa en las labores del Nivel 4185 del proyecto San Germán antes y después de la implementación de la propuesta de mejora*

<b>Parámetro</b>	<b>Antes de la Propuesta (Promedio)</b>	<b>Después de la Propuesta (Promedio)</b>	<b>Cambio (%)</b>
<b>Velocidad del aire (m/min)</b>	18.1	30.0	+65,7%
Labor 1	17.9	30.6	+70,9%
Labor 2	18.1	29.2	+61,3%
Labor 3	18.2	30.3	+66,5%
<b>Temperatura (°C)</b>	28.9	20.9	-27,7%
Labor 1	28.7	20.1	-29,9%
Labor 2	28.9	21.3	-26,3%
Labor 3	29.2	21.1	-27,6%
<b>Humedad (%)</b>	79.1	56.3	-28,8%
Labor 1	79,9	56.2	-29,6%
Labor 2	78.2	56.1	-28,3%
Labor 3	79.3	56.4	-28,8%

Nota: Información extraída de la base de datos.

La tabla 6, presenta los resultados de la velocidad del aire, temperatura y humedad relativa en las labores del Nivel 4185 de la Mina San Germán, antes y después de la implementación de la propuesta de mejora. En cuanto a la velocidad del aire, el promedio general mostró un aumento significativo, pasando de 18.1 m/min a 30.0 m/min, lo que representa un incremento del 65.7%. En la Labor 1, la velocidad aumentó de 17.9 m/min a 30.6 m/min, lo que equivale a un incremento del 70.9%. La Labor 2 también mostró un aumento, pasando de 18.1 m/min a 29.2 m/min, con un incremento del 61.3%, mientras que en la Labor 3, la velocidad aumentó de 18.2 m/min a 30.3 m/min, con un incremento del 66.5%.

Este aumento en la velocidad del aire indica una mejora significativa en la ventilación, lo que es sumamente importante para la eficiencia en las operaciones mineras, ya que una mayor velocidad puede ayudar a reducir la concentración de polvo y gases nocivos, mejorando así la calidad del aire.

En lo que respecta a la temperatura, el promedio general disminuyó de 28.9°C a 20.9°C, lo que representa una reducción del 27.7%. En la Labor 1, la temperatura pasó de 28.7°C a 20.1°C, con una reducción del 29.9%. La Labor 2 mostró una disminución de 28.9°C a 21.3°C, equivalente a una reducción del 26.3%, y en la Labor 3, la temperatura disminuyó de 29.2°C a 21.1°C, con una reducción del 27.6%. Esta reducción de la temperatura es un indicativo positivo de que las condiciones térmicas en la mina han mejorado, contribuyendo a un ambiente adecuado, ya que temperaturas más bajas pueden reducir el estrés térmico, mejorando la productividad.

En cuanto a la humedad relativa, el promedio general disminuyó de 79.1% a 56.3%, lo que representa una reducción del 28.8%. En la Labor 1, la humedad



pasó de 79.9% a 56.2%, con una reducción del 29.6%. La Labor 2 mostró una disminución de 78.2% a 56.1%, equivalente a una reducción del 28.3%, y en la Labor 3, la humedad disminuyó de 79.3% a 56.4%, con una reducción del 28.8%. Esta disminución en la humedad relativa es beneficiosa, ya que niveles altos de humedad pueden acarrear complicaciones en los trabajadores, y por ende, en la producción. Una humedad más baja mejora la calidad del aire, impide el crecimiento de moho y reduce la sensación de calor, haciendo el ambiente de trabajo más adecuado.

Entonces, la implementación de la propuesta de mejora ha tenido un impacto positivo en las condiciones ambientales de la mina. La aumentada velocidad del aire, la disminución de la temperatura y la reducción de la humedad relativa son indicadores de un ambiente de trabajo más seguro y saludable para los trabajadores. Estos cambios pueden contribuir a una mayor eficiencia operativa y al bienestar de los empleados.

#### **4.1.2.1. Proceso de optimización del sistema de inyección del aire para el proyecto San Germán NV 4185.**

Para optimizar el sistema de inyección de aire para el proyecto San Germán NV 4185, se ejecutaron actividades para mejorar las condiciones de ventilación de la labor:

- Construcción de una chimenea tipo VCR de 2.0 x 2.0 m desde el nivel 4200 al 4185, con el objetivo de abastecer aire limpio desde el circuito Carabaya.



- Instalación de 2 ventiladores de 74,000 cfm en serie para ventilar inicialmente un alcance de 1,000 m. Posteriormente, para alcanzar los 1,500 m, se añadirá un tercer ventilador en serie.
- Instalación de una doble línea de mangas de ventilación de 40” de diámetro.

El objetivo de la propuesta de ventilación fue aumentar el caudal de aire fresco de 74,000 cfm a 135,000 cfm hacia la cámara pulmón.

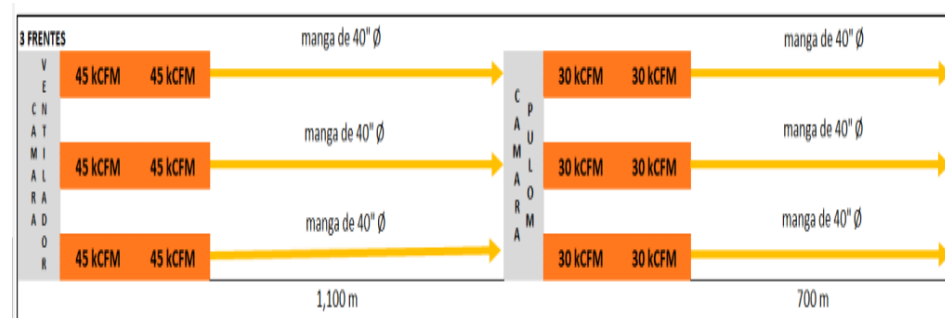
Para ello, fue necesario ampliar la cámara actual de ventiladores con el fin de instalar nuevos ventiladores de Alta Presión Estática. En esta nueva cámara ampliada, se colocaron tres conjuntos de ventiladores en paralelo, cada uno con una capacidad de 60,000 cfm.

Cada conjunto estuvo compuesto por dos ventiladores en serie de alta presión, los cuales introdujeron aire fresco a través de líneas de manga independientes de 40” de diámetro hasta la cámara pulmón, situada a 1,100 metros. Además, se añadió una tercera línea de manga de 40” de diámetro desde los ventiladores hasta la cámara pulmón. En esta cámara, también se instalaron tres conjuntos de ventiladores en paralelo, cada uno con una capacidad de 30,000 cfm, compuestos por dos ventiladores en serie de alta presión que inyectaron el aire fresco mediante líneas de manga de 40” de diámetro hacia los frentes.



**Figura 1**

*Esquema de instalación de ventiladores Nivel 4185*



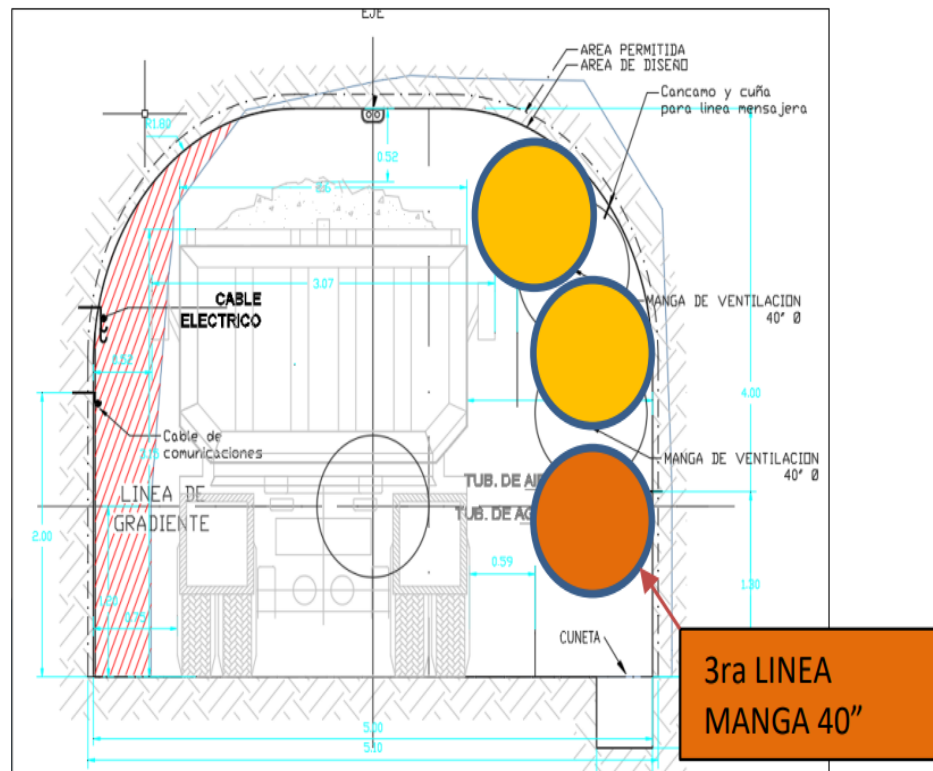
Nota: Información extraída de MINSUR (2022)

En la figura 1, se observa 3 frentes de ventilación, cada uno con un caudal de 45 Kcfm. Desde los 3 frentes, hay una manga de ventilación de 40'' de diámetro que se extiende hasta una distancia de 1,100 m. En ese punto hay una cámara de distribución donde el caudal de 45 Kcfm se divide en líneas de 30 Kcfm cada una. Estas líneas de 30 Kcfm cada una se extienden a través de mangas de ventilación de 40'' de diámetro por otros 700 m hasta el final del recorrido.

Entonces esta fue la propuesta mejorada e implementada de un sistema de inyección de aire con 3 frentes de 45 Kcfm cada uno, que se distribuyen a través de mangas de 40'' de diámetro hasta una cámara a 1,100 m, donde el caudal se divide en líneas de 30 Kcfm cada una, las cuales se extienden por otros 700 m hasta el final del recorrido.

**Figura 2**

*Plano del nuevo diseño de instalación de mangas de 40''*



Nota: Información extraída de MINSUR (2022)

La figura 2, muestra un plano del área permitida y área de diseño, se trata del espacio designado para el diseño y la instalación del sistema de inyección de aire. Se cuenta con las líneas que representan el cable eléctrico y la línea de gradiente, elementos importantes para la infraestructura del proyecto.

Se muestran tres círculos que representan las mangas de ventilación de 40'' de diámetro. Estas mangas se extienden a lo largo del recorrido para distribuir el aire. Se indica la presencia de una cuneta, que sirve para el drenaje o el manejo de aguas.

Se destaca la adición de una tercera línea de manga de 40” de diámetro, la cual se implementó o amplió en el sistema de ventilación.

En los anexos 7 y 8, se muestra un sistema de inyección de aire en una instalación subterránea. Se destacan dos áreas principales: una **“Cámara Pulmón”** y una **“Cámara de Ventiladores”**. La línea principal, que es un conducto de ventilación de aire, se extiende a lo largo del plano con varias marcas o puntos que indican ubicaciones importantes dentro del sistema. Los colores y líneas representan tipos de mangas, dirección de flujo y rutas de ventilación en el sistema.

En el anexo 9, detalla una **“Cámara pulmón de ventiladores”** que tiene una capacidad de mover 30 Kcfm. En la imagen se observan varios ventiladores alineados que canalizan el aire a través de conductos, representados por líneas naranjas. Esta cámara se encarga de mantener un flujo constante de aire a través del sistema subterráneo, lo que es crucial para la ventilación.

En el anexo 10, proyecta la **“Ampliación de la cámara de ventiladores”**, aumentando la capacidad hasta 45 Kcfm. Se observan más ventiladores distribuidos en distintos niveles, lo que indica que el sistema está diseñado para optimizar la circulación de aire en múltiples secciones del área subterránea. Esta expansión asegura una ventilación adecuada en una mayor extensión de la instalación, mejorando la capacidad del sistema actual.



#### **4.1.3. Objetivo específico 3: Resultados obtenidos y comparados con las normas y las adecuadas prácticas de la industria minera**

Los resultados de la investigación han sido evaluados en función del D.S. N° 024-2016-EM y sus modificatorias, Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería, que establece disposiciones para garantizar la seguridad y los estándares en labores subterráneas.

Los resultados obtenidos tras la implementación del sistema de ventilación cumplen con los estándares establecidos en el DS N° 024-2016-EM y sus modificatorias, lo que evidencia que las condiciones de trabajo han mejorado significativamente en términos de temperatura, humedad y velocidad del aire. Estas mejoras garantizan las operaciones mineras con las prácticas seguras y adecuadas de la industria. La propuesta se presenta como una solución efectiva y sostenible para mejorar las condiciones laborales en entornos subterráneos.

**Tabla 7**

*Comparación de resultados con la normativa DS-024-2016-EM*

Parámetro	Antes de la Propuesta (Promedio)	Después de la Propuesta (Promedio)	Cambio (%)	Norma DS-024-2016-EM	Cumplimiento con Normativa
<b>Velocidad del aire (m/min)</b>				<b>Artículo 248</b> : Mínimo de 20 m/min en áreas subterráneas, excepto donde se utilice ANFO (mínimo 25 m/min).	<b>Antes</b> : No cumple en promedio. <b>Después</b> : Cumple en todas las labores con el mínimo requerido. <b>Antes</b> : No cumple. <b>Después</b> : Cumple. <b>Antes</b> : No cumple. <b>Después</b> : Cumple. <b>Antes</b> : No cumple. <b>Después</b> : Cumple.
Labor 1	18.1	30.0	+65,7%		
Labor 2	17.9	30.6	+70,9%		
Labor 3	18.1	29.2	+61,3%		
	18.2	30.3	+66,5%		
<b>Temperatura (°C)</b>				<b>Artículo 252</b> : Velocidad mínima de 30 m/min cuando la temperatura oscila entre 24°C y 29°C.	<b>Antes</b> : No cumple con la velocidad mínima. <b>Después</b> : Cumple con condiciones de temperatura adecuada.
Labor 1	28.9	20.9	-27,7%		
Labor 2	28.7	20.1	-29,9%		<b>Antes</b> : No cumple. <b>Después</b> : Cumple.
Labor 3	28.9	21.3	-26,3%		<b>Antes</b> : No cumple. <b>Después</b> : Cumple.
	29.2	21.1	-27,6%		<b>Antes</b> : No cumple. <b>Después</b> : Cumple.
<b>Humedad (%)</b>				<b>Artículo 281</b> : Las áreas de almacenamiento de deben estar en condiciones secas, recomendado < 70% para confort	<b>Antes</b> : Excesiva. <b>Después</b> : Se acerca a niveles adecuados para comodidad. <b>Antes</b> : Excesiva. <b>Después</b> : Mejorada. <b>Antes</b> : Excesiva. <b>Después</b> : Mejorada. <b>Antes</b> : Excesiva. <b>Después</b> : Mejorada
Labor 1	79.1	56.3	-28,8%		
Labor 2	79.9	56.2	-29,6%		
Labor 3	78.2	56.1	-28,3%		
	79.3	56.4	-28,8%		

Nota: Información extraída de la base de datos.



Según la tabla 7, en relación al cumplimiento de las normas, se tiene que, en cuanto a la Velocidad del aire, antes de la intervención, la velocidad del aire promedio (18.1 m/min) en las tres labores evaluadas no alcanzaba el mínimo establecido de 20 m/min. Esto implica que, antes de la intervención, la ventilación era insuficiente para cumplir con las normas, exponiendo a los trabajadores a condiciones de posible acumulación de contaminantes y niveles de oxígeno posiblemente inadecuados. Después de la intervención, con la implementación de la propuesta de ventilación, la velocidad del aire promedio aumentó significativamente a 30.0 m/min, superando el mínimo requerido por la norma en todos los trabajos. Esto asegura una ventilación adecuada que cumple con la normativa DS-024-2016-EM y sus modificatorias mejora las condiciones de calidad de aire en el entorno laboral subterráneo.

En lo concerniente a la Temperatura, antes de la intervención, la temperatura promedio en las labores se mantuvo alrededor de 28.9 °C, lo que, según la norma, requeriría una velocidad de ventilación mínima de 30 m/min para garantizar un ambiente térmico confortable. Dado que la velocidad del aire era inferior a este valor, las condiciones antes de la intervención no cumplían con las recomendaciones de la normativa. Después de la intervención, la temperatura promedio bajó a 20.9 °C, lo cual es un cambio positivo. Al bajar de 24 °C, las condiciones de temperatura ahora se encuentran dentro de un rango aceptable para el confort de los trabajadores, sin necesidad de incrementar aún más la velocidad de ventilación, cumpliendo así con los estándares de la industria.

En lo que respecta a la humedad, antes de la intervención, los niveles de humedad promedio (79.1%) en todos los trabajos eran altos, lo que puede



contribuir a condiciones incómodas y potenciales problemas de salud, además de acelerar la corrosión de los equipos. Aunque la DS-024-2016-EM y sus modificatorias no establece un rango específico de humedad para áreas de trabajo generales, es recomendado en la industria mantener niveles de humedad por debajo del 70%. Después de la propuesta, los niveles de humedad promedio disminuyeron a 56.3%, acercándose a un rango considerado más cómodo para los trabajadores y óptimo para reducir problemas de mantenimiento en equipos y herramientas. Este cambio mejora las condiciones generales de trabajo y se considera favorable en las prácticas de la industria minera.

Entonces, los resultados obtenidos después de la intervención cumplen en gran medida con los estándares establecidos en la normativa DS-024-2016-EM y sus modificatorias con las prácticas recomendadas en la industria minera.

#### **4.1.4. Prueba de hipótesis de investigación**

##### **a) Formulación de la hipótesis**

Ho: El sistema de ventilación implementado para las operaciones subterráneas no es eficaz en el proyecto San Germán NV 4185, U.M. San Rafael.

Hi: El sistema de ventilación implementado para las operaciones subterráneas es eficaz en el proyecto San Germán NV 4185, U.M. San Rafael.

##### **b) Elección del modelo estadístico**

Se utilizó T *Statistic* para muestras relacionadas, para comprobar las hipótesis estadísticas.

### c) Definición de parámetros y nivel de significancia

El nivel de significancia para la presente investigación es ( $\alpha$ ): 0.05 (5%). Esto implica que se acepta una probabilidad de error:  $\alpha < 5\%$ .

El valor crítico (o T tabla) de la tabla de T de *Student* es 1.8595 (Gl = 9-1 =8;  $\alpha=0.05$ ), que permitió comparar el valor con la T de *Student* obtenida o calculada.

### d) Resultado

**Tabla 8**

*Prueba de hipótesis de la velocidad del aire*

	Prueba de muestras emparejadas					t	gl	Sig. (bilateral)
	Diferencias emparejadas							
	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
				Inferior	Superior			
- Velocidad de aire (m/min) Antes de la intervención - Velocidad de aire (m/min) después de la intervención	11,9667	2,3596	,7865	13,7804	10,1530	15,215	8	,000

Nota: Información extraída de la base de datos.

**Tabla 9**

*Prueba de hipótesis de temperatura*

	Prueba de muestras emparejadas					t	gl	Sig. (bilateral)
	Diferencias emparejadas							
	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
				Inferior	Superior			
- Temperatura (C°) Antes de la intervención - Temperatura (C°) después de la intervención	8,0889	1,6586	,5529	6,8139	9,3638	14,630	8	,000

Nota: Información extraída de la base de datos.



**Tabla 10**

*Prueba de hipótesis de humedad*

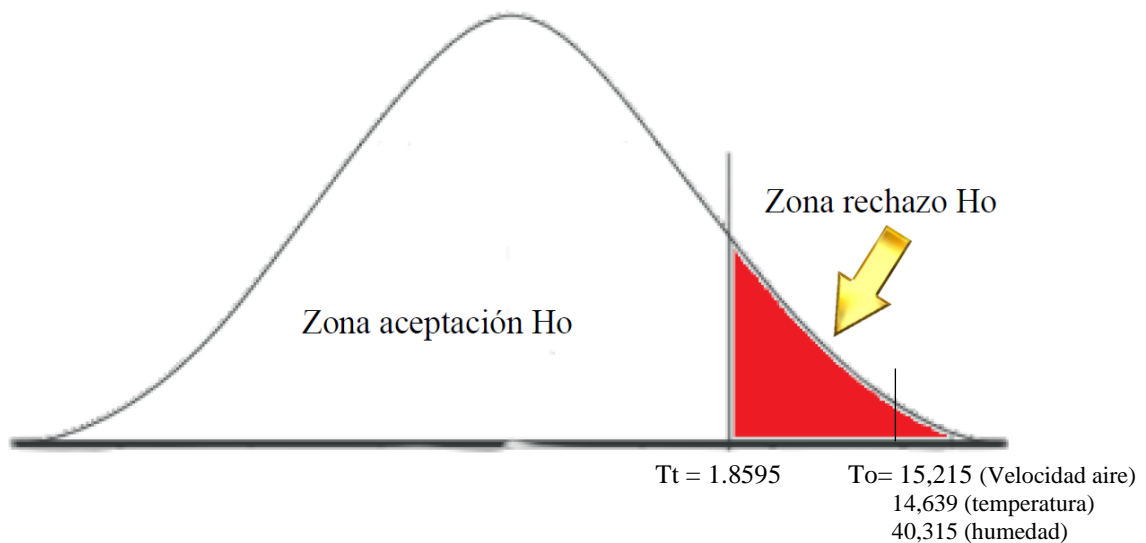
	Prueba de muestras emparejadas					t	gl	Sig. (bilateral)
	Diferencias emparejadas							
	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
				Inferior	Superior			
- Humedad (%) Antes de la intervención - Humedad (%) después de la intervención	22,8889	1,7033	,5678	21,5796	24,1981	40,315	8	,000

Nota: Información extraída de la base de datos.

**e) Decisión estadística**

**Figura 3**

*Campana de datos (Curva normal)*



Nota: Información extraída de la base de datos.

El *p-value* del estadístico T de *Student* es 0.000 (velocidad del aire), 0.000 (temperatura) y 0.000 (humedad), que son valores menores que el nivel de significancia de 0.05. Además, se tiene el valor crítico (Tt): 1.8595 y los valores



calculados ( $T_0$ ) son: velocidad del aire: 15.215; temperatura: 14.639; humedad: 40.315.

Entonces, los valores calculados de  $T$  para la velocidad del aire, temperatura y humedad son significativamente mayores que el valor crítico de 1.8595. Esto indica que los valores caen en la zona de rechazo de  $H_0$ , proporcionando evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula y aceptar la hipótesis alternativa ( $H_1$ ), que afirma que el sistema de inyección de aire implementado es eficaz en el Proyecto San Germán NV 4185.

## 4.2. DISCUSIÓN

La investigación realizada en el proyecto San Germán ha permitido evaluar de manera efectiva los cambios en la velocidad del aire, temperatura y humedad relativa antes y después de la implementación de un nuevo sistema de inyección de aire. Los resultados obtenidos no solo son significativos desde el punto de vista estadístico, sino que también se alinean con las normas de seguridad y salud ocupacional en minería, lo que respalda la eficacia del sistema propuesto.

**Objetivo general: Efectividad del sistema de inyección de aire para garantizar condiciones óptimas de velocidad del aire, temperatura y humedad relativa.**

El análisis de los resultados obtenidos confirma la efectividad del sistema de inyección de aire implementado en el proyecto San Germán, cumpliendo con el objetivo general de garantizar condiciones óptimas de velocidad del aire, temperatura y humedad relativa en los trabajos subterráneos. Los resultados específicos evidenciaron incrementos significativos en la velocidad del aire en las tres labores evaluadas.



Esta tendencia es consistente con lo señalado por Córdoba y Molina (2011) y Turpo y Samos (2022), quienes resaltan la relevancia de un caudal de aire adecuado en la seguridad y confort laboral.

Los hallazgos de esta investigación demuestran que el sistema de implementación aborda problemáticas comunes en la literatura, como la recirculación de aire y la evacuación de gases, destacadas por Wilberth (2019) y Loayza (2021). Esto posiciona al sistema de inyección de aire del proyecto San Germán como un modelo de intervención efectiva para mejorar las condiciones de trabajo en entornos subterráneos.

### **Objetivo específico 1: Velocidad del aire, temperatura y humedad relativa**

Los datos presentados en las tablas 4, 5 y 6 muestran que en la Labor 1, la velocidad del aire aumentó de 16 m/min a 27 m/min (+68.8%) y de 20 m/min a 36 m/min (+80.0%), mejorando la ventilación. En la Labor 2, el mínimo pasó de 17 m/min a 27 m/min (+58.8%) y el máximo de 20 m/min a 31 m/min (+55.0%). En la Labor 3, el mínimo subió de 16 m/min a 26 m/min (+62.5%) y el máximo de 21 m/min a 33 m/min (+57.1%).

En cuanto a la temperatura, en la Labor 1, la mínima bajó de 27 °C a 17 °C (-37.0%) y la máxima de 31 °C a 23 °C (-25.8%). En la Labor 2, la mínima se redujo de 27 °C a 19 °C (-29.6%) y la máxima de 30 °C a 24 °C (-20.0%). En la Labor 3, el mínimo pasó de 27 °C a 18 °C (-33.3%) y el máximo de 31 °C a 24 °C (-22.6%).

La humedad relativa también disminuyó en todas las labores. En la Labor 1, la mínima bajó de 78% a 55% (-29.5%) y la máxima de 84% a 57% (-32.1%). En la Labor 2, la mínima se redujo de 75% a 55% (-26.7%) y la máxima de 81% a 57% (-29.6%). En la Labor 3, el mínimo pasó de 75% a 56% (-25.3%) y el máximo de 82% a 57% (-30.5%). Estos cambios indican mejoras significativas en las condiciones de trabajo.



Este resultado es consistente con lo reportado por Córdoba y Molina (2011), quienes enfatizan la importancia de garantizar una adecuada ventilación en las minas subterráneas para asegurar la seguridad. Destacan que una velocidad de aire adecuada es fundamental para la dispersión de gases tóxicos, lo que coincide con los beneficios observados en el proyecto San Germán. Por otro lado, Turpo y Samos (2022) también reportan la importancia del caudal de aire en la efectividad del sistema de ventilación, indicando que un balance adecuado entre el aire de entrada y salida es crucial para mantener condiciones laborales seguras. En su estudio, se menciona que un caudal de aire insuficiente puede llevar a condiciones peligrosas, lo que refuerza la relevancia del incremento en la velocidad del aire en nuestra investigación.

### **Objetivo específico 2: Evaluación de la efectividad de los sistemas de ventilación**

La implementación del nuevo sistema de inyección de aire no solo ha logrado cumplir con los estándares establecidos, sino que también ha demostrado ser eficaz en la mejora de las condiciones de trabajo. La prueba de hipótesis realizada confirma que las diferencias observadas en la velocidad del aire, temperatura y humedad son estadísticamente significativas ( $p\text{-value} < 0.000$ ), lo que respalda la hipótesis alternativa de que el sistema de ventilación es eficaz.

Comparando estos resultados con estudios previos, como los de Turpo y Samos (2022) y Fernández (2022), se observa que los caudales de aire y las condiciones de ventilación en sus investigaciones también reflejan la importancia de un sistema bien diseñado. En el caso de Turpo y Samos, el balance de caudal de aire se muestra crítico para la efectividad del sistema, lo que resalta la necesidad de un diseño que minimice la recirculación de aire, un aspecto que fue abordado en la mina San Germán.



La temperatura promedio en las labores del proyecto San Germán disminuyó en un 27,7%, lo que es un aspecto positivo para la salud ocupacional. Este resultado se alinea con las observaciones de Cárdenas (2020), quien señala que un sistema de ventilación mejorado no solo incrementa la eficiencia del trabajo, sino que también minimiza el riesgo de exposición a temperaturas extremas. La reducción de la temperatura es esencial para prevenir el estrés térmico.

Además, Morales (2019) destaca la importancia de un diseño de ventilación que permita una adecuada circulación del aire, lo que contribuye a mantener temperaturas óptimas en las labores subterráneas. Esto es relevante en el contexto de nuestra investigación, donde la disminución de la temperatura es un indicador claro de la efectividad del sistema implementado.

La reducción de la humedad relativa en un 28,8% también es un hallazgo significativo. Este resultado es comparable con los estudios de Ramos (2019), quien menciona que la optimización del sistema de ventilación mediante la implementación de chimeneas y otras infraestructuras puede mejorar las condiciones ambientales en las minas. La disminución de la humedad es crucial para evitar problemas de confort y salud, como el riesgo de enfermedades respiratorias.

Quispe (2021) también aborda el tema de la humedad, señalando que un déficit en el aire fresco puede llevar a un aumento en la humedad relativa, lo que afecta negativamente las condiciones de trabajo. En nuestra investigación, la mejora en la humedad relativa indica que el nuevo sistema de ventilación ha logrado abordar este problema, alineándose con las recomendaciones de los autores mencionados.



### **Objetivo específico 3: Comparación con normas y prácticas**

Los resultados obtenidos se evaluaron en función del D.S. N° 024-2016-EM y sus modificatorias, que establece disposiciones para garantizar la seguridad en labores subterráneas. Antes de la implementación, el sistema de inyección de aire no cumplía con los estándares requeridos, mientras que después de la intervención, todas las labores cumplían con los parámetros mínimos establecidos. Este cumplimiento no solo mejora la seguridad laboral, sino que también optimiza la eficiencia operativa.

Los hallazgos de Córdoba y Molina (2011) y Mendoza (2024) resaltan la importancia de una adecuada ventilación para asegurar el confort y la seguridad de los trabajadores. La mejora en la calidad del aire y la reducción de la humedad en la mina San Germán son testimonio de que la gestión adecuada de la ventilación puede marcar una diferencia significativa en la salud ocupacional.

Al comparar los resultados de esta investigación con los de otros autores, como Zavaleta (2023), se evidencia que la optimización del sistema de ventilación es un tema recurrente en la literatura. Zavaleta menciona problemas de recirculación y tiempos prolongados en la evacuación de gases, problemas que se abordaron eficazmente en este estudio. Asimismo, Wilberth (2019) y Loayza (2021) también destacan la importancia de un diseño de ventilación flexible y eficiente, lo que refuerza la relevancia de las mejoras implementadas en el proyecto San Germán.



## V. CONCLUSIONES

**PRIMERA:** La implementación de un sistema de inyección de aire en el proyecto San Germán NV 4185, U.M. San Rafael, mejora significativamente la velocidad del aire, la temperatura y la humedad, garantizando un ambiente óptimo, debido a la incorporación de ventiladores de mayor capacidad y la ampliación de la cámara de ventilación, lo que ha permitido una distribución más eficiente del aire fresco en las operaciones subterráneas. Asimismo, el p-value del estadístico T de Student es 0.000 (velocidad del aire), 0.000 (temperatura) y 0.000 (humedad), que son valores menores que el nivel de significancia de 0.05. Además, se tiene el valor crítico ( $T_t$ ): 1.8595 y los valores calculados ( $T_o$ ) son: velocidad del aire: 15.215; temperatura: 14.639; humedad: 40.315. Entonces, los valores calculados de T para la velocidad del aire, temperatura y humedad son significativamente mayores que el valor crítico de 1.8595. Esto indica que los valores caen en la zona de rechazo de  $H_0$ , proporcionando evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula y aceptar la hipótesis alternativa ( $H_i$ ), que afirma que el sistema de ventilación implementado es eficaz en el proyecto San Germán NV 4185.

**SEGUNDA:** Las condiciones iniciales de la velocidad del aire, temperatura y humedad relativa en el proyecto San Germán NV 4185, U.M. San Rafael, no cumplen con los estándares óptimos antes de la intervención, ya que en la Labor 1, la velocidad del aire aumentó de 16 m/min a 27 m/min (+68.8%) y de 20 m/min a 36 m/min (+80.0%), mejorando la ventilación. En la Labor 2, el mínimo pasó de 17 m/min a 27 m/min (+58.8%) y el máximo de 20 m/min



a 31 m/min (+55.0%). En la Labor 3, el mínimo subió de 16 m/min a 26 m/min (+62.5%) y el máximo de 21 m/min a 33 m/min (+57.1%). En cuanto a la temperatura, en la Labor 1, la mínima bajó de 27 °C a 17 °C (-37.0%) y la máxima de 31 °C a 23 °C (-25.8%). En la Labor 2, la mínima se redujo de 27 °C a 19 °C (-29.6%) y la máxima de 30 °C a 24 °C (-20.0%). En la Labor 3, el mínimo pasó de 27 °C a 18 °C (-33.3%) y el máximo de 31 °C a 24 °C (-22.6%). La humedad relativa también disminuyó en todas las labores. En la Labor 1, la mínima bajó de 78% a 55% (-29.5%) y la máxima de 84% a 57% (-32.1%). En la Labor 2, la mínima se redujo de 75% a 55% (-26.7%) y la máxima de 81% a 57% (-29.6%). En la Labor 3, el mínimo pasó de 75% a 56% (-25.3%) y el máximo de 82% a 57% (-30.5%). Estos cambios indican mejoras significativas en las condiciones de trabajo.

**TERCERA:** La implementación de un sistema de inyección de aire es efectiva para mejorar la velocidad del aire y las condiciones de temperatura y humedad en las labores del proyecto San Germán NV 4185, U.M. San Rafael, debido a su capacidad para eliminar gases tóxicos y partículas en suspensión, aunque se requiere mejorar en áreas específicas. Ya que la velocidad del aire mostró un aumento significativo, con un promedio general que pasó de 18.1 m/min a 30.0 m/min (+65.7%). En la Labor 1, aumentó de 17.9 m/min a 30.6 m/min (+70.9%), en la Labor 2 de 18.1 m/min a 29.2 m/min (+61.3%), y en la Labor 3 de 18.2 m/min a 30.3 m/min (+66.5%). Este incremento mejora la ventilación, reduciendo la concentración de polvo y gases nocivos. La temperatura promedio general disminuyó de 28.9 °C a 20.9 °C (-27.7%). En la Labor 1, la temperatura bajó de 28.7 °C a 20.1 °C (-29.9%), en la Labor 2 de 28.9 °C a 21.3 °C (-26.3%), y en la Labor 3 de 29.2 °C a 21.1 °C





(-27.6%). Esta reducción indica una mejora en las condiciones térmicas, lo que puede aumentar la productividad al disminuir el estrés térmico. La humedad relativa promedio también disminuyó de 79.1% a 56.3% (-28.8%). En la Labor 1, pasó de 79.9% a 56.2% (-29.6%), en la Labor 2 de 78.2% a 56.1% (-28.3%), y en la Labor 3 de 79.3% a 56.4% (-28.8%). Esta disminución es beneficiosa, ya que reduce complicaciones para los trabajadores y mejora la calidad del aire, creando un ambiente de trabajo más adecuado.

**CUARTA:** Los resultados obtenidos tras la implementación del sistema de inyección de aire para el proyecto San Germán NV 4185, U.M. San Rafael, cumplen con las normas y estándares establecidos por la industria minera, ya que en cuanto a la Velocidad del aire, antes de la intervención, el promedio de 18.1 m/min no alcanzaba el mínimo normativo de 20 m/min, lo que ponía en riesgo la calidad del aire. Tras la mejora, la velocidad aumentó a 30.0 m/min, cumpliendo con la normativa DS-024-2016-EM y sus modificatorias asegurando una ventilación adecuada en todas las labores. En lo concerniente a la Temperatura, previo a la intervención, la temperatura promedio de 28.9 °C requería una velocidad de ventilación de 30 m/min, que no se alcanzaba, lo cual dificultaba el confort térmico. Después de la intervención, la temperatura bajó a 20.9 °C, situándola en un rango aceptable sin necesidad de aumentar la ventilación., en lo referente a la Humedad el promedio era del 79.1%, superior al nivel recomendado de 70%, lo cual afectaba el confort y el mantenimiento de equipos. Con la intervención, la humedad descendió a 56.3%, mejorando el entorno laboral y reduciendo problemas de corrosión.



## VI. RECOMENDACIONES

**PRIMERA:** A los representantes del proyecto San Germán NV 4185, de la U.M. San Rafael y a los investigadores de Ingeniería Minas, se recomienda profundizar en el análisis y optimización de sistemas de ventilación de en operaciones subterráneas similares para evaluar la efectividad de estos sistemas. La implementación de estudios estadísticos rigurosos permitirá obtener evidencias sólidas de la eficiencia de las mejoras en la calidad ambiental de las minas, lo que contribuirá al desarrollo de normas de seguridad más precisas.

**SEGUNDA:** A los representantes del proyecto San Germán NV 4185, de la U.M. San Rafael, considerando los beneficios comprobados en la reducción de temperatura, humedad y mejora de la velocidad del aire, se recomienda implementar un mantenimiento continuo y monitoreo regular del sistema de ventilación. Asimismo, evaluará y optimizará áreas específicas donde la eliminación de partículas y gases tóxicos aún pueda ser mejorada, asegurará un entorno de trabajo óptimo y seguro para el personal.

**TERCERA:** A los estudiantes y graduados de Ingeniería de Minas, se recomienda realizar prácticas y estudios de campo en el sistema de ventilación del proyecto San Germán NV 4185 o en instalaciones similares. Este tipo de experiencias fortalecerá sus conocimientos en la importancia de la ventilación subterránea para el control de temperatura, humedad y calidad del aire, y les permitirá aplicar herramientas estadísticas para evaluar la eficiencia de proyectos de ingeniería minera.



**CUARTA:** A los docentes de Ingeniería de Minas, se sugiere analizar de manera detallada las características del aire de retorno en los trabajos subterráneos de la mina, con el fin de identificar concentraciones específicas de contaminantes y establecer estrategias de mitigación más eficientes. Este análisis podría incluir la medición de gases como el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el monóxido de carbono (CO) y otros productos de la actividad minera, así como el diseño de sistemas de extracción que minimicen su acumulación en las labores más críticas. Además, se recomienda evaluar el posible gaseamiento, que implica la liberación y acumulación de gases peligrosos en el ambiente subterráneo, para implementar medidas preventivas y de control que garanticen la seguridad de los trabajadores.



## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abad, K. (2023). Evaluación del sistema de ventilación subterránea para cumplir con la normativa vigente en el DS 023-2027 EM, en una mina de Huarochirí, Lima, 2022 [Tesis de Pregrado, Universidad Privada del Norte]. <https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/34955/Abad%20Rojas%20C%20Kevin%20Orlando.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Alhuirca, U. C. L. (2020). Estudio del sistema de ventilación para el control de agentes químicos y físicos, U.O. Pallancata – veta Pablo [Tesis de Pregrado, Universidad Tecnológica del Perú]. [https://repositorio.utp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12867/3417/Ubaldo%20Llacho\\_Armando%20Vargas\\_Tesis\\_Titulo%20Profesional\\_2020.pdf](https://repositorio.utp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12867/3417/Ubaldo%20Llacho_Armando%20Vargas_Tesis_Titulo%20Profesional_2020.pdf)
- Cárdenas, D. (2020). Mejoramiento del sistema de ventilación de minas para suministrar aire limpio a las labores subterráneas. Univesidad nacional de ingenieria.
- Castillo, N., & Soto, J. (2022). Análisis del Sistema de Ventilación y propuesta de mejora para optimizar el Caudal de aire de la minera Aurífera Retamas S.A. Marsa— 2020. Universidad tecnológica del Perú.
- Córdoba, C., & Molina, J. (2021). Caracterización de sistemas de ventilación en minería subterránea. Boletín de Ciencias de la Tierra, 29, 73-86.
- Díaz, M. (2019). Salud y Seguridad en trabajos de minería (Primera). Aulas y Andamios. [https://www.oitcinterfor.org/sites/default/files/salud\\_seg\\_mineria.pdf](https://www.oitcinterfor.org/sites/default/files/salud_seg_mineria.pdf)
- Earzo, N. (2024). Análisis de puesto de trabajo. Estudio y optimización del sistema de ventilación del complejo minero Farallón Negro. Universidad de da fraternidad de agrupaciones Santo Tomás de Aquino.



- Fernández, M. (2022). Rediseño del sistema de ventilación, para su optimización en minería subterránea mecanizada [Tesis de Grado]. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. (2018). Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta.
- Huamani, J. (2020). Mejoramiento del sistema de ventilación subterránea de la mina Condor IV, minera el palacio del Cóndor S.A.C. En Universidad del centro del Perú. Universidad del centro del Perú.
- Loayza, A. (2021). Optimización del sistema de ventilación a corto plazo en la unidad operativa Pallancata – Ayacucho. Universidad Nacional de San Antonio Abad del cusco.
- López, A., & García, B. (2019). Calidad del aire en la industria minera española: Un estudio empírico. *Revista de Salud Ocupacional y Medio Ambiente*, 20(2), 45-62.
- Mendoza, C. (2024). Evaluación del sistema de ventilación e incidencias en el control de riesgos de operaciones mineras, seguridad y salud ocupacional en la UM. Atacocha S.A.A- Nexa Resources. En *Interciencia* (Vol. 1, Número 1). Universidad nacional Daniel Alcides Carrión.
- MINSUR. (2022). Proyecto ventilación San Germán (Primera). UM San Rafael.
- Quispe, W. (2021). Optimización del sistema de ventilación con el software Ventsim-Design en la zona Consuelo I - nivel 2296 de la Unidad Operativa Alpacay—CIA Minera Yanaquihua S.A.C. Universidad nacional del altiplano.



- Ramos, D. (2019). Desarrollo de chimeneas de ventilación, ore pass y waste pass utilizando el metodo de perforación raise boring para la continuidad de labores mineras en la unidad San Rafael. Universidad nacional del altiplano.
- Robles Berumen, R., & Foladori, G. (2019). Una revisión histórica de la automatización de la minería en México. Problemas del Desarrollo. Revista Latinoamericana de Economía, 50(197). <https://doi.org/10.22201/iiec.20078951e.2019.197.64750>
- Roque, J., & Torres, C. (2021). Mejora del Sistema de Aire Comprimido para Optimizar La Perforación en La Cantera Caballo Viejo Jauja, Junín. Universidad César Vallejo.
- Supo, J. (Director). (2019, octubre 19). Diferencias entre el estudio explicativo y aplicativo [Video recording]. <https://www.youtube.com/watch?v=Ls8K-sB1iPo>
- Tejeda, R. (2022). Evaluación de las condiciones de ventilación para la actualización del sistema integral de ventilación Unidad Minera Yauricocha [Tesis de Pregrado, Universidad Continental]. [https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/11374/1/IV\\_FIN\\_10\\_TE\\_Tejeda\\_Mucha\\_2022.pdf](https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/11374/1/IV_FIN_10_TE_Tejeda_Mucha_2022.pdf)
- Toro, N. S. L. (2022). Evaluación de un sistema de ventilación on-demand y de la incorporación de energía solar en el proceso de ventilación minera. <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/189106/Evaluacion-de-un-sistema-de-ventilacion-on-demand-y-de-la-incorporacion-de-energia-solar.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Turpo, N. R. C., & Samos, J. G. S. (2022). Análisis del sistema de ventilación y propuesta de mejora para optimizar el caudal de aire de la minera Aurífera Retamas S. A. Marsa 2020. Universidad Tecnológica del Perú.



Wilberth, B. a. (2019). Ejecución de chimenea con el método raise boring para la optimización del sistema de ventilación en la unidad minera San Rafael—Minsur—2018. En Repositorio de la universidad Sntiago Antúnez de Mayolo (Vol. 1). Huaraz.

Zavaleta, H. (s. f.). Optimización del sistema de ventilación en la mina Sheridan Mining Explorations El Combe EIRL Algamarca, 2023 [Tesis de grado]. Universidad Nacional de Trujillo.

## ANEXOS

ANEXO 1. Matriz de consistencia

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	METODOLOGÍA
<p><b>Problema general</b> ¿Cuál es la eficiencia del sistema de inyección de aire implementado en el Proyecto San Germán NV 4185, U.M. San Rafael, para garantizar condiciones óptimas de velocidad de aire, temperatura y humedad?</p> <p><b>Problemas específicos</b> ¿Cuáles son las condiciones iniciales de la velocidad del aire, la temperatura y la humedad relativa en el Proyecto San Germán NV 4185, U.M. San Rafael?</p> <p>¿Es efectiva la implementación de un sistema de inyección de aire en la mejora de la velocidad del aire y las condiciones de temperatura y humedad en las labores del Proyecto San Germán NV 4185, U.M. San Rafael?</p> <p>¿Cumplen los resultados obtenidos tras la implementación del sistema de inyección de aire para dicho proyecto?. ¿con las normas y estándares establecidos por la industria minera</p>	<p><b>Objetivo general</b> Determinar la eficiencia de un sistema de inyección de aire en el Proyecto San Germán NV 4185, U.M. San Rafael, para garantizar condiciones óptimas de velocidad de aire, temperatura y humedad.</p> <p><b>Objetivos específicos</b> Evaluar las condiciones iniciales de la velocidad del aire, la temperatura y la humedad relativa en el Proyecto San Germán NV 4185, U.M. San Rafael.</p> <p>Evaluar la efectividad de la implementación de un sistema de inyección de aire en la mejora de la velocidad del aire y las condiciones de temperatura y humedad en las labores del Proyecto San Germán NV 4185, U.M. San Rafael.</p> <p>Verificar que los resultados obtenidos tras la implementación del sistema de inyección de aire en dicho proyecto, cumplan con las normas y estándares establecidos.</p>	<p><b>Hipótesis general</b> La implementación de un sistema de inyección de aire en el Proyecto San Germán NV 4185, U.M. San Rafael, mejora significativamente la velocidad del aire, la temperatura y la humedad, garantizando un ambiente óptimo.</p> <p><b>Hipótesis específicas</b> Las condiciones iniciales de la velocidad del aire, temperatura y humedad relativa en el Proyecto San Germán NV 4185, U.M. San Rafael, no cumplen con los estándares óptimos antes de la intervención.</p> <p>La implementación de un sistema de inyección de aire es efectiva para mejorar la velocidad del aire y las condiciones de temperatura y humedad en las labores del Proyecto San Germán NV 4185, U.M. San Rafael.</p> <p>Los resultados obtenidos tras la implementación del sistema de inyección de aire en dicho proyecto, cumplen con las normas y estándares establecidos por la industria.</p>	<p><b>Optimización del Sistema de inyección de aire</b> (Variable Independiente)</p> <p><b>Calidad del aire, temperatura y humedad</b> (Variable Dependiente)</p>	<p>Velocidad del Aire Temperatura Humedad Cumplimiento de Normas</p> <p>Calidad del Aire Control de temperatura Control de humedad</p>	<p><b>Enfoque:</b> Cuantitativo</p> <p><b>Tipo:</b> Experimental</p> <p><b>Diseño:</b> Experimental y analítico.</p> <p><b>Técnicas:</b> La observación directa, Registro de datos, Revisión documental</p> <p><b>Instrumentos:</b> Ficha de observación directa (hoja de cálculo de Excel), Equipos de medición</p>



## ANEXO 2. Base de datos

Antes de la intervención												
N°	Velocidad de aire (m/min)				Temperatura				Humedad			
	Labo r 1	Labo r 2	Labo r 3	PROM EDIO	Labo r 1	Labo r 2	Labo r 3	PROM EDIO	Labo r 1	Labo r 2	Labo r 3	PROM EDIO
1	16	17	16	16.3	31	28	28	29.0	84	80	79	81.0
2	17	18	17	17.3	30	29	27	28.7	82	81	82	81.7
3	18	17	18	17.7	28	30	28	28.7	80	75	80	78.3
4	18	18	17	17.7	27	29	30	28.7	78	81	81	80.0
5	17	17	18	17.3	28	30	31	29.7	80	78	80	79.3
6	19	20	20	19.7	30	29	31	30.0	78	75	78	77.0
7	18	19	19	18.7	29	30	29	29.3	79	79	75	77.7
8	20	18	21	19.7	28	27	29	28.0	78	77	79	78.0
9	18	19	18	18.3	27	28	30	28.3	80	78	80	79.3
Media	17.9	18.1	18.2	18.1	28.7	28.9	29.2	28.9	79.9	78.2	79.3	79.1
Desv est	1.2	1.1	1.6	1.3	1.4	1.1	1.4	1.3	2.0	2.3	2.0	2.1
Min	16	17	16	16.3	27	27	27	28.0	78	75	75	77.0
Max	20	20	21	19.7	31	30	31	30.0	84	81	82	81.7
Después de la intervención												
N°	Velocidad de aire (m/min)				Temperatura				Humedad			
	Labo r 1	Labo r 2	Labo r 3	PROM EDIO	Labo r 1	Labo r 2	Labo r 3	PROM EDIO	Labo r 1	Labo r 2	Labo r 3	PROM EDIO
1	36	31	32	33.0	18	19	19	18.7	56	56	57	56.3
2	29	28	26	27.7	19	24	18	20.3	55	56	56	55.7
3	31	28	32	30.3	17	23	20	20.0	57	55	57	56.3
4	35	29	31	31.7	19	20	22	20.3	56	57	57	56.7
5	28	30	28	28.7	20	19	21	20.0	57	56	56	56.3
6	27	27	30	28.0	22	22	22	22.0	57	57	56	56.7
7	28	31	31	30.0	21	19	23	21.0	56	57	56	56.3
8	30	29	33	30.7	23	22	24	23.0	56	55	56	55.7
9	31	30	30	30.3	22	24	21	22.3	56	56	57	56.3
Media	30.6	29.2	30.3	30.0	20.1	21.3	21.1	20.9	56.2	56.1	56.4	56.3
Desv est	3.1	1.4	2.2	2.2	2.0	2.1	1.9	2.0	0.7	0.8	0.5	0.7
Min	27	27	26	27.7	17	19	18	18.7	55	55	56	55.7
Max	36	31	33	33.0	23	24	24	23.0	57	57	57	56.7



### ANEXO 3. Operacionalización de variables

Variable	Dimensiones	Indicadores	Instrumentos
<b>Efectividad del Sistema de inyección de aire</b> (Variable Independiente)	Velocidad del Aire	Incremento en la velocidad del aire en m/min Cumplimiento con estándar mínimo (20 m/min)	Sensor de velocidad de aire. Sensor de velocidad de aire.
	Temperatura	Disminución de la temperatura (°C) Cumplimiento con estándares de confort ( $\leq 20,9$ °C)	Sensor de temperatura. Sensor de temperatura.
	Humedad	Reducción del porcentaje de humedad relativa Cumplimiento con estándar recomendado ( $\leq 70\%$ )	Sensor de humedad. Sensor de humedad.
	Cumplimiento de Normas	Cumplimiento de DS-024-2016-EM para calidad del aire y seguridad	Revisión documental, normativa legal.
<b>Calidad del aire, temperatura y humedad</b> (Variable Dependiente)	Calidad del Aire	Niveles de contaminación del aire en distintas áreas	Sensor de calidad del aire.
	Control de temperatura	Niveles adecuados de temperatura	Termómetro
	Control de humedad	Niveles de humedad adecuados	Equipos de medición.

#### ANEXO 4. Evidencias fotográficas

**Fotografía 1.** *Manga de ventilación para aumentar el flujo de aire hacia los subniveles y tajos de producción*



**Fotografía 2.** *Interior de la Labor 1 (enfoque lejano)*



**Fotografía 3.** Interior de la Labor 1 (enfoque cercano)



**Fotografía 4.** Equipo de ventilación subterránea de la marca **REMOVEX AB**, especializado en sistemas de ventilación para minas. Este tipo de equipo se utiliza para mejorar la circulación de aire en túneles y galerías subterráneas



**Fotografía 5.** *Anemómetro digital de la marca Kestrel (Primera toma)*



**Fotografía 6.** *Anemómetro digital de la marca Kestrel (Segunda toma)*



**Fotografía 7.** Anemómetro digital de la marca Kestrel (Tercera toma)



**Fotografía 8.** Detector de gases portátil de la marca Altair (Primera Toma)



**Fotografía 9.** *Detector de gases portátil de la marca Altair (Segunda Toma)*



**Fotografía 10.** *Detector de gases portátil de la marca Altair (Tercera Toma)*



**Fotografía 11.** *Detector de gases portátil de la marca Altair (Cuarta Toma)*



**Fotografía 12.** *Detector de gases portátil de la marca Altair (Quinta Toma)*





**Fotografía 13.** *Manga de ventilación para la distribución del aire fresco y la extracción de gases y partículas contaminantes (Primera toma).*



**Fotografía 14.** *Manga de ventilación para la distribución del aire fresco y la extracción de gases y partículas contaminantes (Segunda toma).*



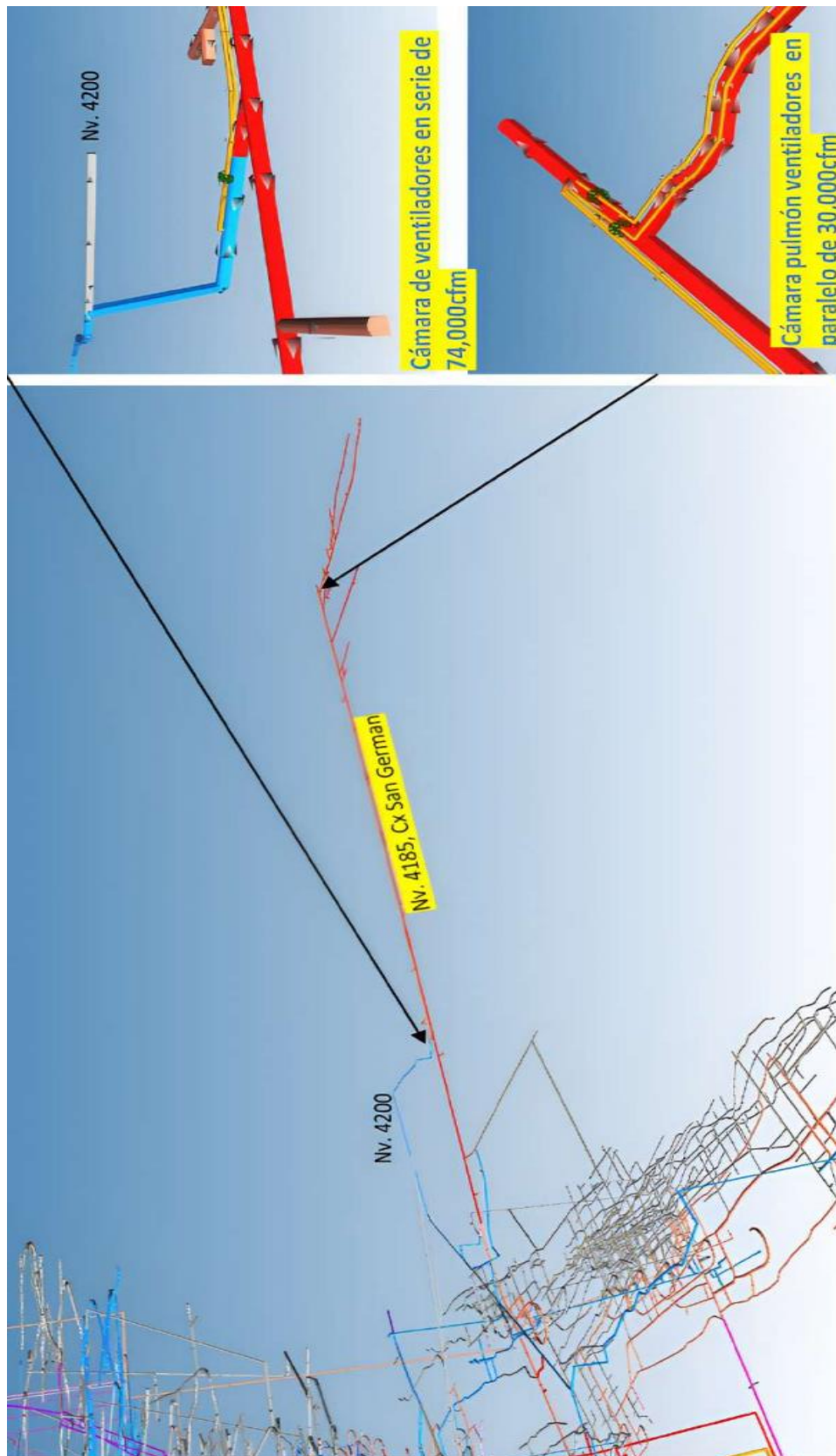
**Fotografía 15.** *Manga de ventilación para la distribución del aire fresco y la extracción de gases y partículas contaminantes (Tercera toma).*



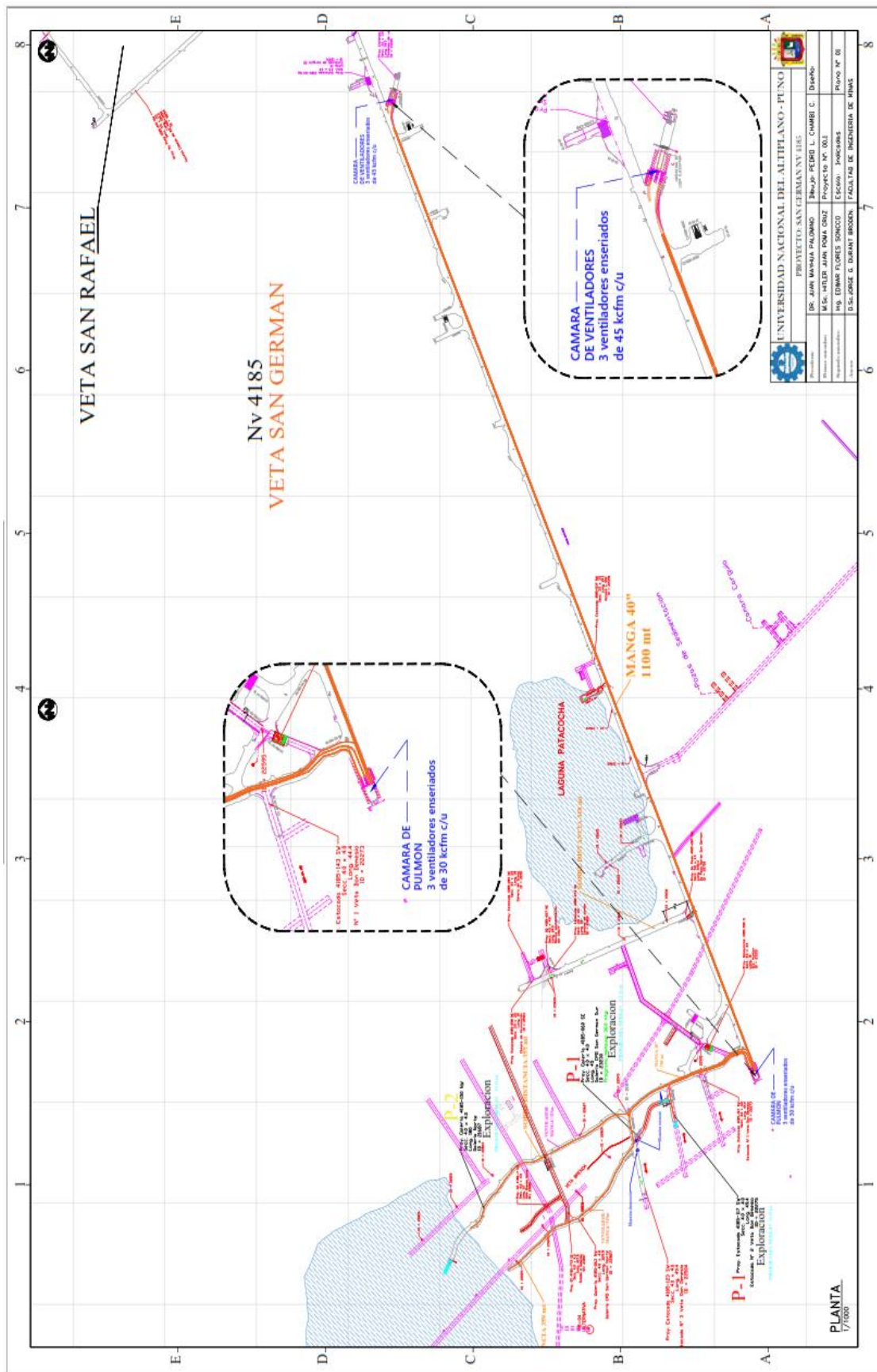
ANEXO 5. Ubicación geográfica de la U.M San Rafael.



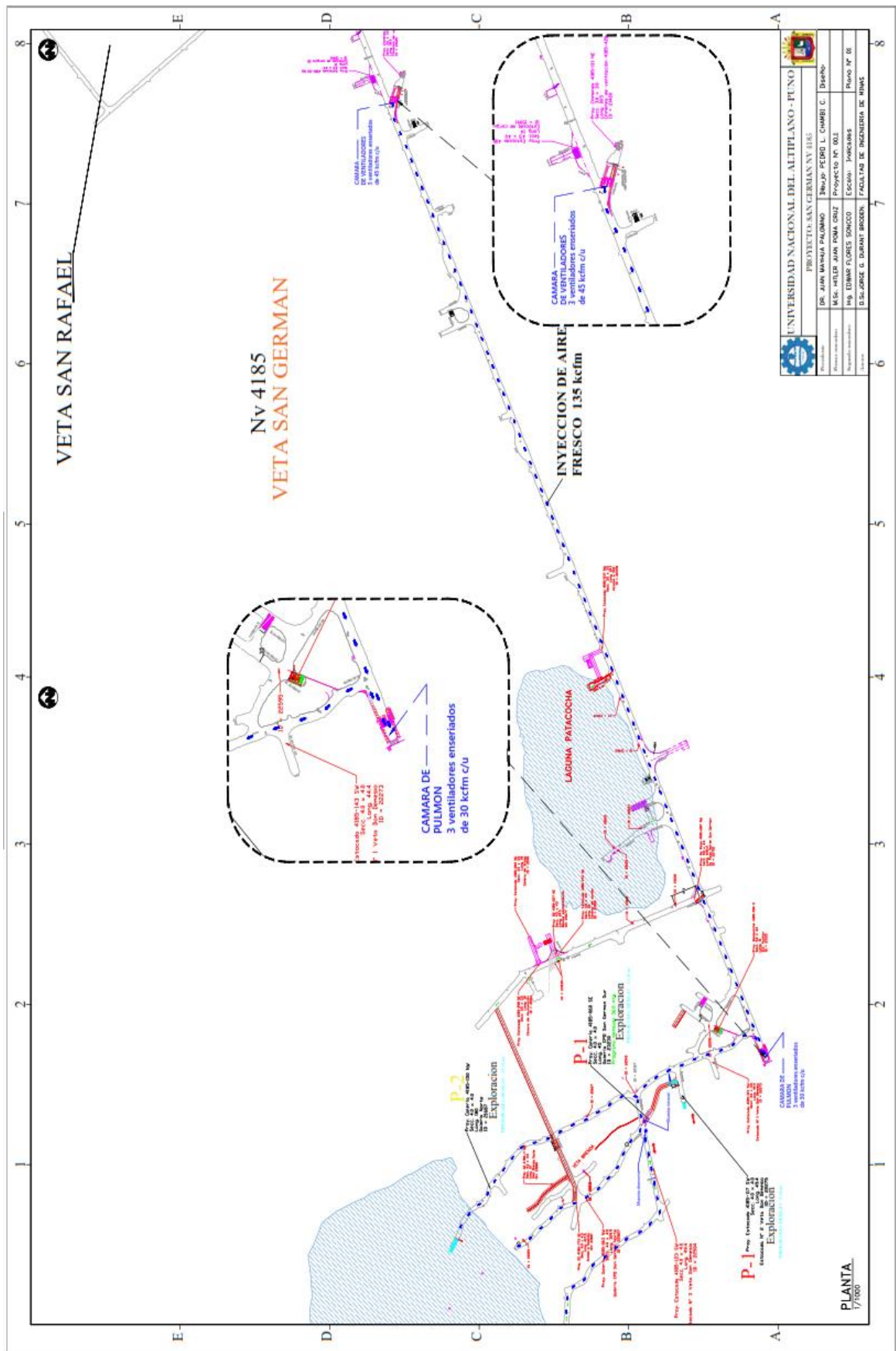
**ANEXO 6.** Plano de Ubicación de tramo del proyecto San Germán Nv 4185, U.M. San Rafael.



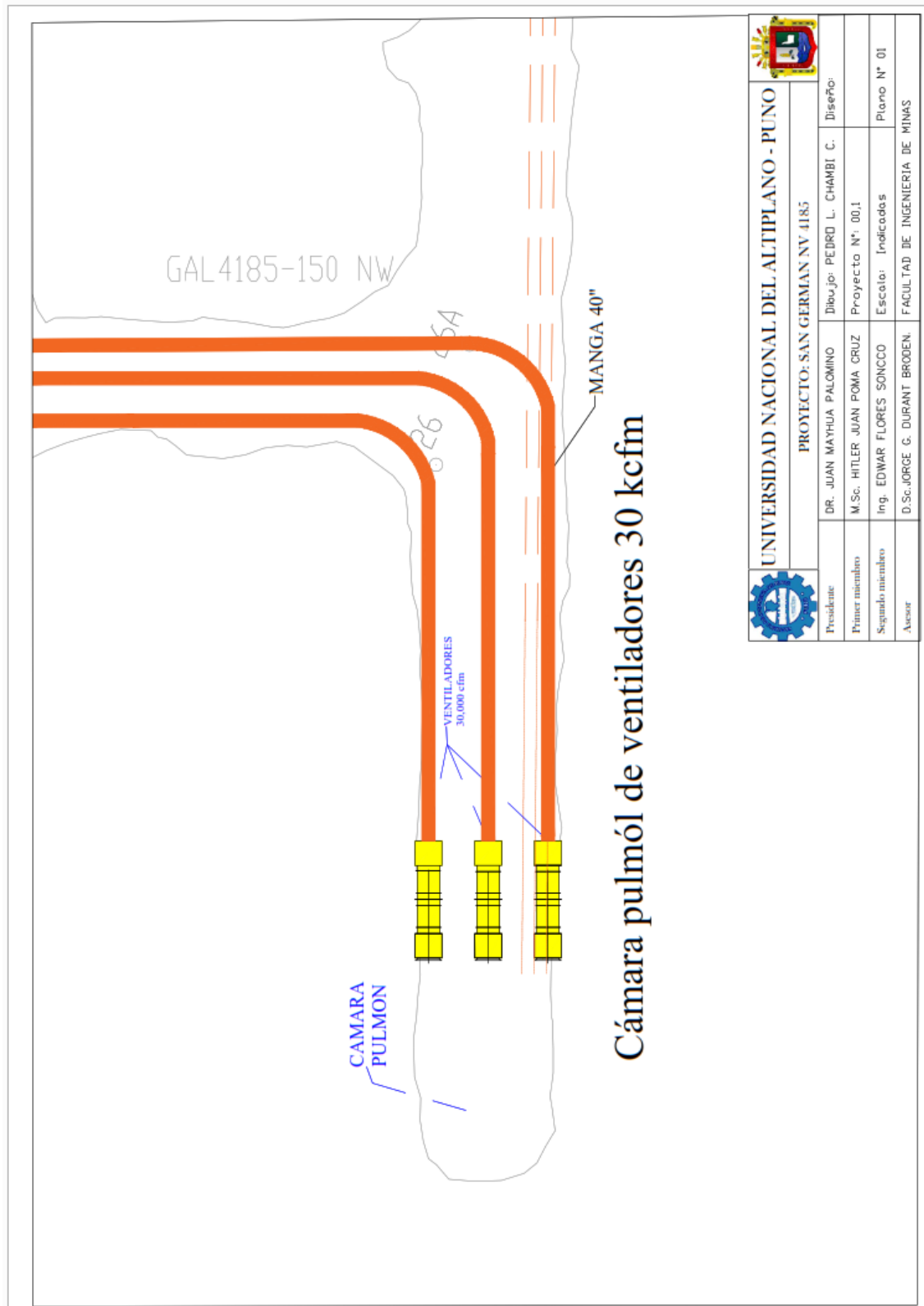
### ANEXO 7. Ubicación de cámara pulmón y cámara de ventiladores y mangas



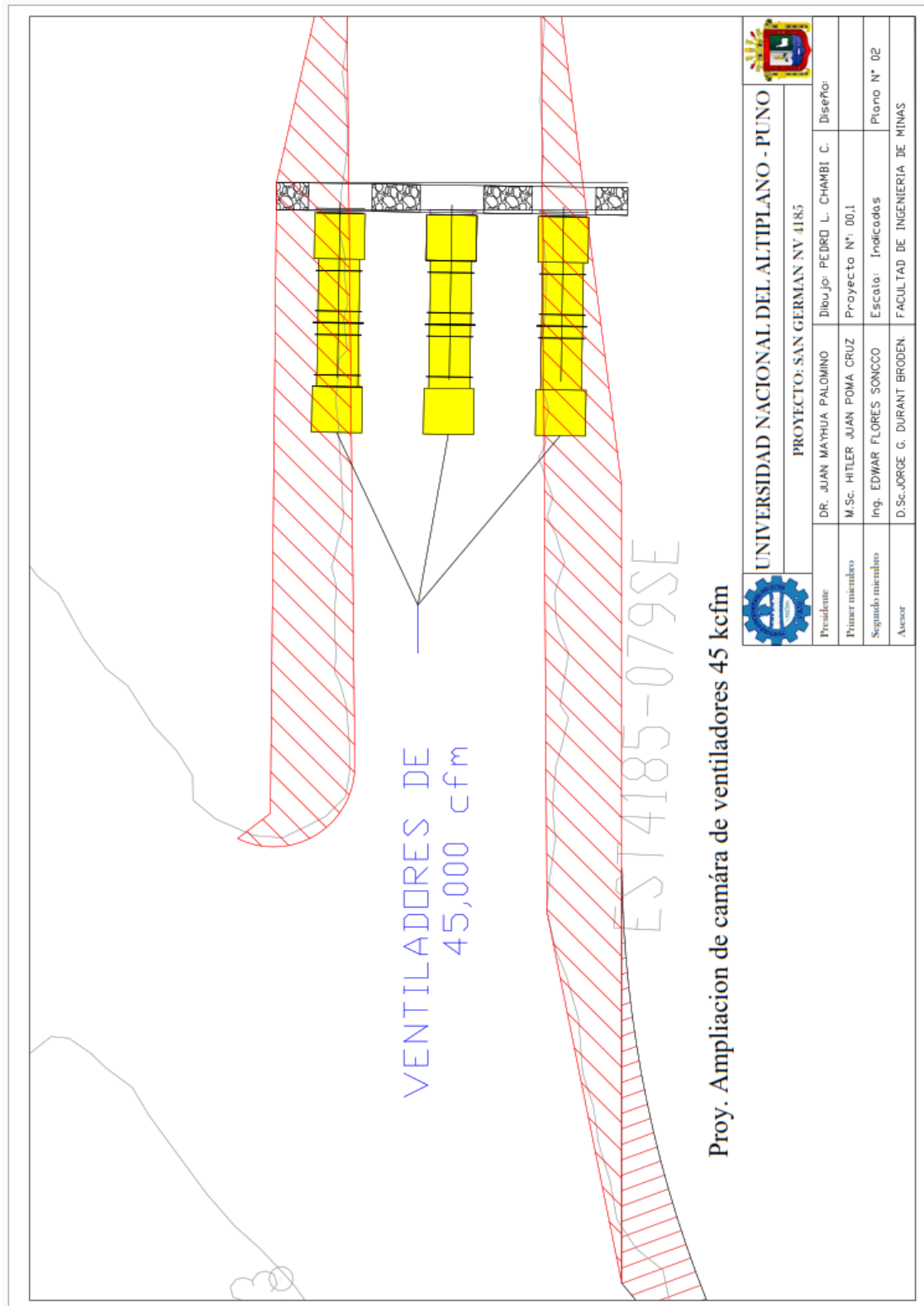
**ANEXO 8.** Dirección de inyección de aire fresco



## ANEXO 9. Cámara de pulmón de ventiladores



**ANEXO 10.** Proyecto de ampliación de cámara de ventiladores







### AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo Pedro Luis Chambi Chahua  
identificado con DNI 77151948 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

Ingeniería de Minas  
informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:

"Efectividad del Sistema de Inyección de aire para el  
proyecto San Germán NV 4185, U.M. San Rafael"

para la obtención de  Grado,  Título Profesional o  Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mio; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 12 de diciembre del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella



### DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo Pedro Luis Chambi Chahuara  
identificado con DNI 77151948 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

Ingeniería de Minas

informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:

"Efectividad del sistema de inyección de Aire para el  
proyecto San Germán NU 4185, U.M. San Rafael"

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 12 de diciembre del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella