Universidad Católica de Santa María

Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

Implementación de un sistema de monitoreo ambiental con sensores inteligentes para mejorar la seguridad en pequeña minería subterránea, Trujillo 2024

Tesis presentada por:

Asencio Puma, Francisco

ORCID: 0009-0008-6260-9379

para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas

Asesor:

Dr. Lopez Casaperalta De Diaz, Patricia Yaneth

ORCID: 0000-0001-5853-2833

Arequipa – Perú

2026

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA DE MINAS

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 16 de Diciembre del 2025

Dictamen: 016285-C-EPIM-2025

Visto el borrador del expediente 016285, presentado por:

2013700131 - ASENCIO PUMA FRANCISCO

Titulado:

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO AMBIENTAL CON SENSORES INTELIGENTES PARA MEJORAR LA SEGURIDAD EN PEQUEÑA MINERÍA SUBTERRÁNEA, TRUJILLO 2024

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Titulo Profesional/Titulo de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO DE MINAS

40902304 - LINARES FLORES CASTRO ANTONIO ERICK
DICTAMINADOR



40379481 - PAREDES SALAS OMAR WILLY
DICTAMINADOR



46969384 - TICONA CORRALES SERGIO
DICTAMINADOR



Implementación de un sistema de monitoreo ambiental con sensores inteligentes para mejorar la seguridad en pequeña minería subterránea, Trujillo 2024

INFORME DE ORIGINALIDAD

7%	7%	2%	2%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Católica de Santa María Trabajo del estudiante	1%
2	repositorio.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	1%
3	www.coursehero.com Fuente de Internet	1%
4	repositorio.uladech.edu.pe Fuente de Internet	<1%
5	bio.hgy.es Fuente de Internet	<1%
6	es.slideshare.net Fuente de Internet	<1%
7	www.saludcantabria.org Fuente de Internet	<1%
8	hdl.handle.net Fuente de Internet	<1%
9	repositorio.unheval.edu.pe Fuente de Internet	<1%
10	www.slideshare.net Fuente de Internet	<1%
11	perumin.com Fuente de Internet	<1%

DEDICATORIA

A mi familia, mis padres y todas aquellas personas que forman parte de mi vida. Les dedico cada proyecto y cada plan que muestra lo mejor de mí y de sus enseñanzas.

Francisco Asencio Puma

AGRADECIMIENTOS

A mi amada esposa y a mi hijo, así como a mis padres por ser ese apoyo y respaldo permanente en mi vida.

Francisco Asencio Puma

EPÍGRAFE

"El futuro se forma con los pasos que damos diariamente"

RESUMEN

En nuestro país, la minería subterránea se enfrenta diariamente a riesgos asociados con ambientes y atmósferas peligrosas, especialmente por el descenso de oxígeno (O_2) y la presencia de monóxido de carbono (CO), un gas tóxico que ha provocado numerosos accidentes.

En el periodo 2024-2025, la unidad fiscalizadora OSINERGMIN ha reportado que las intoxicaciones por monóxido de carbono (CO) y los entornos con falta de oxígeno son las causas más frecuentes de muertes en minería subterránea.

Considerando dichos lineamientos, el presente trabajo de investigación tuvo como objetivo implementar un frente piloto para medir O_2 y CO en una unidad minera subterránea de pequeña escala ubicada en Trujillo, utilizando sensores inteligentes, funcionales y económicos. El sistema propuesto se basa en el uso de nodos híbridos de CO y O_2 con tecnología electroquímica y comunicación inalámbrica LoraWAN con un servidor local tipo Edge; todos estos elementos fueron elegidos considerando los aspectos técnicos, económicos y operativos.

Después de la instalación y supervisión en el frente piloto, los resultados demostraron su eficacia al detectar eventos atmosféricos críticos, lo cual permitió la adopción e implementación de las acciones preventivas para asegurar la protección de los trabajadores contribuyendo con su seguridad y continuidad en el desarrollo de las tareas programadas a lo largo de una jornada laboral.

Finalmente. los equipos y el diseño implementado por sus características, costos y condiciones de mantenimiento mínimas pueden ser replicados en unidades mineras de pequeña escala

Palabras clave: Oxígeno, monóxido de carbono, sensores inteligentes.

ABSTRACT

In our country, underground mining faces daily risks associated with hazardous environments and atmospheres, especially due to decreased oxygen (O_2) levels and the presence of carbon monoxide (CO), a toxic gas that has caused numerous accidents.

In the period 2024-2025, the regulatory agency OSINERGMIN reported that carbon monoxide (CO) poisoning and oxygen-deficient environments were the most frequent causes of death in underground mining. Considering these guidelines, this research aimed to implement a pilot project to measure O_2 and CO in a small-scale underground mining unit located in Trujillo, using smart, functional, and cost-effective sensors. The proposed system is based on the use of hybrid CO and O_2 nodes with electrochemical technology and LoRaWAN wireless communication with a local edge server. All these elements were chosen considering technical, economic, and operational aspects.

After installation and monitoring at the pilot site, the results demonstrated their effectiveness in detecting critical atmospheric events, allowing for the adoption and implementation of preventive actions to ensure worker protection and contribute to their safety and the continuity of scheduled tasks throughout the workday.

Finally, the equipment and design implemented, due to their characteristics, costs, and minimal maintenance requirements, can be replicated in small-scale mining operations.

Keywords: Oxygen, carbon monoxide, smart sensors.

ÍNDICE

DEDICATORIA
AGRADECIMIENTOS
EPÍGRAFE
RESUMEN
ABSTRACT
INTRODUCCIÓN 1
CAPÍTULO I 3
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 4
1.1 Determinación del problema 4
1.2 Objetivo de la investigación 6
1.2.1 Objetivo general 6
1.2.2 Objetivos específicos 6
1.3 Preguntas de investigación 6
1.3.1 Pregunta principal 6
1.3.2 Preguntas especificas 7
1.4 Línea de investigación a la que corresponde el problema 7
1.5 Palabra clave 7
1.6 Justificación e importancia 8
1.6.1 Justificación Académica 8
1.6.2 Justificación Económica 10
CAPÍTULO II 13
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS 14
2.1 Estado del arte 14
2.1.1 Antecedentes de la investigación 16
2.2 Hipótesis 20
2.2.1 Variable independiente 21
2.2.2 Variable independiente 21
CAPÍTULO III 23
3 ALCANCES Y LIMITACIONES 24
3.1 Alcances 24
3.2 Limitaciones 25
3.3 Tipo y nivel de investigación 26
3.3.1 Tipo de investigación 26
3.3.2 Nivel de investigación 26

3.4 Población y muestra 27
3.4.1 Población 27
3.4.2 Muestra 27
3.5 Método, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos 28
3.5.1 Procedimiento y técnica de recolección de datos 28
3.5.2 Técnicas de recolección de datos 29
3.5.3 Plan de análisis estadístico de los datos 30
3.6 Lugar de desarrollo de investigación 30
3.6.1 Ubicación temporal 31
3.7 Requisitos del sistema a implementar 31
3.8 Implementación del sistema 32
3.8.1 Puntos de monitoreo 32
3.8.2 Configuración por puntos 33
3.9 Operación y mantenimiento del sistema 36
3.10 Sensores evaluados para su implementación 36
3.11 Sistema de red de sensores y flujos de alerta 40
3.11.1 Componentes principales 40
3.11.2 Flujo de datos y alertas 40
3.12 Funcionamiento del sistema de monitoreo 43
3.13 Reportes de eventos antes y después de la implementación del sistema 44
3.14 Funcionamiento de las alertas y su aporte en la reducción de eventos 46
3.15 Estimación de ahorro por reducción de eventos en pequeña minería subterránea 47
3.16 Costos de implementación del sistema 50
3.17 Costos de operación y mantenimiento 51
3.18 Características de la implementación 53
3.18.1 Compatibilidad y funcionamiento 55
3.18.2 Ficha Técnica del Sensor de Oxígeno 58
3.18.3 Ficha Técnica del Sensor de CO Tipo Electroquímico 59
3.18.4 Especificaciones técnicas sensor integrado Tipo Nodo O_2 + CO 60
3.19 Áreas de cobertura estimadas 61
3.19.1 Puntos de instalación en el frente piloto 61
3.19.2 Arquitectura de la instalación 62
3.20 Procedimiento operativo para el frente modelo 63
3.20.1 Frecuencia de monitoreo 64
3.21 Beneficios de la implementación del sistema 66

3.21.1 Reducción de incidentes por gases nocivos 66
3.21.2 Reducción porcentual 73
3.22 Instrumentos para la recolección de datos 78
3.23 Procedimiento para el registro y obtención de datos del monitoreo de gases 78
3.24 Ubicación de los sensores 82
3.25 Control inicial y calibración en campo 82
3.26 Justificación técnica, ergonómica y operativa según punto de instalación 83
3.27 Gráficos de tendencia antes y después de la implementación del sistema de monitoreo 87
CAPÍTULO IV 90
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN 91
4.1 CONCLUSIONES 94
4.2 RECOMENDACIONES 96
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 97
ANEXOS 100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de variables 22
Tabla 2 Resumen técnico por punto 35
Tabla 3 Matriz de decisión de sensores O_2 + CO 39
Tabla 4 Resumen de alarmas y valores registrados antes de la implementación 44
Tabla 5 Resumen de alarmas y valores registrados después de la implementación 45
Tabla 6 Reducción porcentual de alarmas e incidentes 46
Tabla 7 Ahorro estimado 50
Tabla 8 Costos de implementación del sistema 50
Tabla 9 Inversión vs. Ahorro 52
Tabla 10 Instalación punto por punto 57
Tabla 11 Especificaciones técnicas sensor de oxigeno 58
Tabla 12 Especificaciones técnicas del sensor de CO 59
Tabla 13 Especificaciones técnicas del sensor integrado 60
Tabla 14 Umbrales de respuesta 65
Tabla 15 Concentraciones de O_2 y CO antes de la implementación (línea base) 69
Tabla 16 Concentraciones de O_2 y CO después de la instalación de sensores fijos 72
Tabla 17 Comparativa consolidada de O_2 y CO antes y después 74
Tabla 18 Tabla comparativa O_2 antes y después de la implementación de sensores 75
Tabla 19 Tabla comparativa de CO antes y después de la implementación de sensores 75
Tabla 20 Ubicación de sensores 82
Tabla 21 Tabla de monitoreo semanal de línea base (12 semanas) 100
Tabla 22 Esquema comparativo: LoRa vs LoRaWAN 102

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Identificación de la zona de estudio 28
Figura 2 Detector MSA Altair 4XR Mining 37
Figura 3 Arquitectura funcional del sistema de monitoreo 42
Figura 4 Plano esquemático de la implementación del sistema de monitoreo ambiental 54
Figura 5 Libelium Smart Environment PRO 56
Figura 6 Dragino LAQ4 LoRaWAN Air Quality Sensor 57
Figura 7 Arquitectura de instalación de sensores 62
Figura 8 Tendencia de O_2 (%) pre/post implementación del sistema 87
Figura 9 Tendencia de CO (ppm) antes y después del monitoreo ambiental 88

INTRODUCCIÓN

La minería subterránea de pequeña escala en el Perú es un sector productivo con gran importancia económica y social; sin embargo, es también uno de los procesos operacionales más expuestos a condiciones ambientales y atmósferas peligrosas, factores que resultan de la ventilación deficiente y la infraestructura muchas veces limitada por recursos operativos. La presencia y acumulación del monóxido de carbono (CO) y la reducción de oxígeno (O_2) son algunos de los riesgos más graves, ya que pueden provocar intoxicaciones agudas, pérdida del conocimiento, problemas respiratorios e incluso la muerte tras breves períodos de exposición.

Estos peligros atmosféricos se vuelven más graves en trabajos a mayor profundidad, zonas con tráfico de equipos diésel, áreas con combustión incompleta y lugares donde la circulación del aire es deficiente.

Diversos informes del Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERGMIN, 2024–2025) muestran que una parte considerable de los accidentes mortales en minería subterránea se asocia con atmósferas contaminadas por gases tóxicos, particularmente el monóxido de carbono (CO), además de la disminución del oxígeno debido a fallas en los sistemas de ventilación. Uno de los casos más difundidos por la prensa nacional fue el accidente de Yanaquihua, aunque también se han reportado varios accidentes en otras operaciones mineras subterráneas, los accidentes reportados estuvieron asociados a la acumulación de monóxido de carbono y la falta oxígeno.

Estos sucesos evidencian un problema constante que se acrecienta por las limitaciones económicas y condiciones críticas que suelen presentar las operaciones mineras subterráneas a pequeña escala.

La mediana y gran minería disponen de sistemas sofisticados para monitorear y evitar exponerse a atmósferas peligrosas, mientras que la pequeña minería, sobre todo en el área de

Trujillo y en la región de La Libertad, se enfrentan día a día con restricciones técnicas y económicas que afectan directamente a las condiciones de seguridad óptimas que deberían de tener los trabajadores. Por esta razón, se necesita una solución factible, viable, mediante la implementación de un sistema que contribuya con la identificación de atmósferas peligrosas y que se fundamente en tecnologías resistentes y de mantenimiento reducido que hagan posible la mejora de la seguridad y el cuidado de la integridad de la persona.

En este escenario, los sensores inteligentes de oxígeno y monóxido de carbono son una opción eficaz y asequible. La existencia de sensores electroquímicos de bajo consumo que se integran a redes inalámbricas como LoraWAN y que son soportados por plataformas locales, como el Edge computing, posibilita la creación de sistemas para monitorear entornos peligrosos (atmósferas riesgosas). Dichos sistemas pueden registrar eventos relacionados con atmósferas peligrosas y lanzar alertas en tiempo real, así como optimizar la toma de decisiones operativas.

Estos sistemas, además por sus características requieren de infraestructura básica y tienen la posibilidad de ser instalados de manera gradual, comenzando por un frente piloto y extendiéndose a otros niveles o galerías conforme se desarrolla la operación y se tiene acceso a los recursos necesarios para su implementación.

Este sistema se aplicará en un frente piloto de una operación subterránea de pequeña escala, ubicada en Trujillo, en el año 2024. La propuesta se basa en la necesidad de minimizar la exposición del personal a ambientes peligrosos y optimizar la gestión del riesgo operativo, lo cual se lograría a través de la implementación de tecnologías económicas, funcionales y viables. Mediante un diseño cuasiexperimental, se analizan las circunstancias previas y posteriores a la implementación del sistema, tomando en cuenta indicadores tales como la detección de eventos críticos mediante la activación de alarmas que, se activen si los valores registrados se encuentran por debajo o por encima de los umbrales establecidos tanto del oxígeno como del monóxido de carbono respectivamente.

CAPÍTULO I

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Determinación del problema

La pequeña minería subterránea en el Perú afronta situaciones operativas que, en particular, la hacen más vulnerable a la existencia de atmósferas peligrosas. La reducción de oxígeno disponible y la acumulación de gases tóxicos son provocadas por factores como la falta de ventilación, el uso intensivo de maquinaria diésel, las tareas que se realizan a grandes profundidades y las restricciones presupuestarias. En lugares de explotación en los que el aire circula poco o donde hay fuentes de combustión constantes, esta circunstancia aumenta considerablemente el grado de peligro, lo que pone a los trabajadores en riesgo de asfixia e intoxicación.

Según varios informes publicados por OSINERGMIN (2024-2025), en años recientes, una parte significativa de los accidentes mortales en la minería subterránea se relaciona con la exposición al monóxido de carbono (CO) y la falta de oxígeno (O_2). Estos sucesos ocurren más a menudo en operaciones de pequeña escala, donde no hay sistemas que monitoreen los diferentes frentes de manera continua, por lo tanto, no se pueden identificar alteraciones perjudiciales en la calidad del aire. De igual manera, reportajes y evaluaciones de accidentes importantes, como los que sucedieron en Yanaquihua y en varios pequeños yacimientos de La Libertad, revelan que la ausencia de supervisión en tiempo real de O_2 y CO ha contribuido a la muerte de personas.

A pesar de estos antecedentes, numerosas operaciones de pequeña minería se basan en técnicas tradicionales y esporádicas de medición, como los detectores portátiles manuales. Estos métodos no posibilitan un monitoreo constante, ni garantizan la emisión de alertas instantáneas frente a cambios repentinos en atmósferas peligrosas en la operación minera.

Las operaciones pequeñas de la zona de Trujillo, donde los frentes de explotación generalmente funcionan con equipos diésel cerca de los empleados sumada a la ventilación restringida vienen empeorando las condiciones de seguridad. Si no existe un sistema que posibilite la detección de la acumulación de CO o la reducción del O_2 en tiempo real, las medidas correctivas se llevan a cabo con retraso, lo que incrementa el riesgo de intoxicaciones, desmayos y accidentes mortales.

Es por lo expuesto que, se hace necesario establecer un sistema de monitoreo ambiental constante, factible y asequible, que se base en sensores inteligentes de CO y O_2. Este sistema debe posibilitar la detección a tiempo de condiciones críticas y minimizar el riesgo relacionado con atmósferas peligrosas en las tareas subterráneas.

Esta solución tecnológica comenzará en una fase piloto y se podrá implementar de manera gradual, con la oportunidad de optimizar notablemente los indicadores de seguridad en la pequeña minería, sin necesidad de grandes inversiones o infraestructuras complicadas.

1.2 Objetivo de la investigación

1.2.1 Objetivo general

Implementar un sistema de monitoreo ambiental con sensores inteligentes de monóxido de carbono (CO) y oxígeno (O_2) para mejorar la seguridad laboral en una operación minera subterránea de pequeña escala en Trujillo, 2024.

1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar la línea base de las concentraciones de monóxido de carbono y oxígeno en tres sitios críticos para su consideración como frente modelo.
- Determinar puntos de instalación de los sensores para O_2 y CO para su consideración como frente modelo.
- Realizar una medición antes y después de la implementación de sensores para evaluar los indicadores de mejora con el objetivo de eliminar eventos críticos y contribuir con el cuidado y la seguridad de los trabajadores en una mina subterránea.

1.3 Preguntas de investigación

1.3.1 Pregunta principal

¿Cómo influye la implementación de un sistema de monitoreo ambiental con sensores inteligentes de oxígeno (O_2) y monóxido de carbono (CO) en la mejora de la seguridad laboral en una operación minera subterránea de pequeña escala en Trujillo, 2024?

1.3.2 Preguntas especificas

- ¿Por qué se debe medir las concentraciones iniciales del monóxido de carbono y de oxígeno en distintos puntos críticos de la mina subterránea?
- ¿Qué consideraciones técnicas se deben tomar en cuenta para la instalación de los sensores para la medición de atmósferas peligrosas tanto de oxígeno como de monóxido de carbono?
- ¿Por qué es importante realizar una medición antes y después de la implementación de los sensores inteligentes en el frente modelo?
- ¿Cómo contribuirá la implementación de sensores inteligentes de oxígeno y monóxido de carbono en un frente modelo y cuál será su repercusión en la seguridad laboral?

1.4 Línea de investigación a la que corresponde el problema

Según las líneas de investigación de la Universidad Católica de Santa María para la Escuela Profesional de ingeniería de minas e indicando que se presentan según la Modalidad Presencial AUTO N° 019-VRINV-2019; la presente investigación corresponde a "Seguridad minera", ya que, se ve busca implementar sensores para medir las concentraciones de monóxido de carbono y oxígeno y evitar tragedias en minas subterráneas.

1.5 Palabra clave

- Monóxido de carbono
- Oxigeno
- Sensores inteligentes

1.6 Justificación e importancia

1.6.1 Justificación Académica

La puesta en marcha de un sistema de monitoreo de atmósferas peligrosas, que cuente con sensores inteligentes de monóxido de carbono (CO) y oxígeno (O_2) en la minería subterránea a pequeña escala, es necesaria e importante para identificar los parámetros críticos que afectan a la seguridad y a la continuidad operativa en las actividades subterráneas. Las minas subterráneas a pequeña se distinguen por tener frentes angostos, ventilación limitada y una exposición elevada a fuentes de combustión durante el desarrollo de operaciones, por lo que es esencial monitorear las atmósferas peligrosas para evitar sucesos críticos como intoxicación, asfixia y pérdida de capacidad laboral.

La elección de los sensores de O_2 y CO, desde una perspectiva técnica, está determinada por prioridad de riesgo, pues estos gases son los que originan más a menudo situaciones de emergencia en minas pequeñas que no están mecanizadas o lo están parcialmente. La falta de ventilación produce una reducción del oxígeno, y una acumulación de CO (monóxido de carbono) derivada del uso de motores diésel, combustión incompleta, descomposición de maderas o actividades con explosivos son las situaciones más peligrosas que se han registrado en los accidentes laborales a nivel nacional. Además, dado que se trata de gases cuyo comportamiento en galerías es predecible, es factible demostrar su monitoreo a través de mediciones comparativas antes y después de la implementación, lo cual posibilita validar el sistema desde un punto de vista técnico.

La tecnología de sensores electroquímicos para O_2 y CO ofrece ventajas significativas para la pequeña minería:

- Bajo costo unitario.
- Fácil instalación en galerías y frentes.
- Mantenimiento mínimo.
- Consumo energético reducido.
- Compatibilidad con sistemas inalámbricos de corto alcance.
- Y vida útil de acuerdo con su hoja técnica de 18 a 24 meses, incluso en ambientes húmedos o polvorientos.

Los sensores del sistema de monitoreo ambiental se colocarán en lugares clave del frente minero. Con un sistema LoRaWAN, sin cables, los que se comunicarán con el gateway que está situado en la bocamina. Cuando se utiliza una unidad central local, es posible contar con un sistema que puede escalarse y replicarse a otros niveles de la mina sin necesidad de infraestructura complicada o redes IP sofisticadas. Dado que la señal y la energía disponibles son limitadas en las operaciones de menor tamaño, esta propiedad es esencial.

La propuesta se apoya, desde un punto de vista técnico, en que los datos producidos por los sensores facilitan la toma de decisiones inmediatas. Por ejemplo, aumentar el caudal de ventilación, evacuar a los trabajadores o reprogramar las actividades de voladura. Esto ayuda a disminuir directamente el riesgo laboral y mejora la administración de la ventilación subterránea. Asimismo, el sistema posibilitará la creación de registros históricos que se pueden emplear para auditorías internas, inspecciones, cumplimiento de normativas (DS 024-2016-EM) y optimización constante en seguridad.

En resumen, la implementación del sistema resulta técnica y justificadamente adecuada para la pequeña minería subterránea, ya que es asequible, confiable en cuanto a tecnología seleccionada, y se relaciona de manera clara con los incidentes y accidentes más comunes.

1.6.2 Justificación Económica

Implementar un sistema de monitoreo ambiental con sensores inteligentes que midan el monóxido de carbono (CO) y el oxígeno (O_2) en una operación subterránea de pequeña minería es una opción económicamente factible, el mantenimiento básico requerido y los grandes beneficios obtenidos al disminuir incidentes y/o accidentes relacionados con atmósferas peligrosas. Los sensores electroquímicos seleccionados permiten obtener una solución económica que puede adecuarse a la infraestructura existente sin necesidad de equipos especializados, cableado complicado ni sistemas centralizados. Esto es diferente de los sistemas de monitoreo industrial a gran escala empleados en operaciones medianas o mecanizadas.

El costo medio de adquisición de sensores de O_2 y CO certificados para la minería está en un rango adecuado para la pequeña minería, lo cual representa una inversión justificada comparado con los costos que acarrean incidentes de intoxicación o asfixia. Estos costos incluyen pérdida de horas-hombre, interrupciones en las operaciones, gastos médicos o indemnizaciones, multas regulatorias y posibles paradas impuestas por autoridades fiscalizadoras. Investigaciones de la industria indican que cualquier evento con efectos moderados puede causar pérdidas que equivalen a semanas enteras de producción, lo que excede considerablemente la inversión inicial del sistema.

Un factor importante para considerar es la calibración de los sensores es con el uso de gases patrón de acuerdo con lo establecido por el fabricante, por su diseño y características la calibración se puede realizar de acuerdo con un programa quincenal y la revisión del estado de los sensores instalados puede ser programada 1 vez al año. Esto supone un costo adecuado y puede ser realizado por el personal técnico de la operación, sin necesidad de contratar servicios especializados externos.

Desde una perspectiva macroeconómica, la implementación del sistema ayuda a lograr una mayor continuidad en las operaciones, ya que evita paradas no planificadas y tiempos muertos debido a condiciones climáticas inseguras. Esto implica un incremento directo de la productividad y una optimización del uso de los recursos materiales y humanos.

Asimismo, posibilita obtener registros históricos de la calidad del aire, lo cual ayudará a mostrar la aplicación de buenas prácticas durante las inspecciones, disminuyendo así el riesgo de accidentes y multas o interrupciones temporales por no cumplir con el Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería (DS 024- 2016-EM).

En términos generales, la propuesta proporciona un beneficio económico relativo elevado, teniendo en cuenta su costo de implementación reducido, su rápida amortización y su aporte directo a la disminución de accidentes, una mayor continuidad operativa y una menor exposición a penalidades. Por lo tanto, la alternativa propuesta es apropiada y económicamente justificable para la situación financiera de la pequeña minería subterránea.

Justificación Social

Esta investigación tiene una justificación social significativa porque ayuda de manera directa a proteger la vida y la salud de los trabajadores que están expuestos al riesgo elevado propio de la pequeña minería subterránea. Los accidentes asociados con la insuficiencia de oxígeno y el monóxido de carbono siguen siendo, en este tipo de operaciones, una de las razones más importantes detrás de los accidentes fatales y no fatales. Esto se debe a la ventilación limitada, al uso generalizado de maquinaria diésel, a las quemas de ANFO, a los fuegos incipientes y al acumulamiento de gases en lugares cerrados. Esta situación ha sido constatada en varios informes sobre la actividad minera en Perú, donde las intoxicaciones por CO y los sucesos de asfixia representan un problema frecuente en las unidades mineras, particularmente aquellas que poseen frentes angostos o áreas con ventilación deficiente.

La implementación de un sistema de monitoreo medioambiental con sensores inteligentes de O_2 y CO contribuye a mejorar significativamente el bienestar social del personal operativo, ya que se puede detectar con prontitud atmósferas peligrosas y activar alertas para prevenir accidentes graves. Así, la tecnología propuesta mejorará el sentido de seguridad y la cultura preventiva entre el personal que trabaja en ambientes con atmósferas peligrosas.

La reducción de eventos peligrosos contribuye con una mayor estabilidad laboral y social, mejora el ambiente laboral dentro de la organización y crea confianza en la empresa entre los empleados y los directivos.

La adopción de tecnologías accesibles y económicas para optimizar la seguridad en la pequeña minería fomenta prácticas responsables y sostenibles desde un punto de vista social más amplio, que están en relación con los principios del trabajo decente y el resguardo de la vida. Además, mejora la percepción de las actividades mineras en la sociedad, evidenciando que hasta las operaciones de menor tamaño son capaces de aplicar soluciones tecnológicas apropiadas y enfocadas en el bienestar del ser humano.

Por lo tanto, la propuesta no solo atiende un requerimiento técnico, sino también una exigencia social urgente que consiste en salvaguardar a los empleados mineros, optimizar las condiciones de trabajo y disminuir las tasas de accidentes vinculados con la calidad del aire, sobre todo con la existencia de atmósferas riesgosas en trabajos subterráneos.

CAPÍTULO II

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Estado del arte

La última década ha visto un progreso notable en la supervisión ambiental de la minería subterránea, gracias a los avances en tecnologías de comunicación inalámbrica con gran alcance y sensores inteligentes económicos. Varios estudios indican que los sistemas fundamentados en plataformas de transmisión de datos como LoRaWAN y sensores electroquímicos son opciones factibles y asequibles para operaciones pequeñas o medianas, donde la infraestructura tecnológica frecuentemente es escasa. A continuación, se presentan seis estudios relevantes que apoyan la solución propuesta en esta investigación.

Kumar et al. (2023) crearon un sistema de comunicación LoRa (Long Range) para monitorear gases en túneles, evaluando su alcance y estabilidad en condiciones de visibilidad bloqueada y directa. Los autores concluyen que LoRa, la modulación de radio, permite un monitoreo permanente y confiable en galerías de tamaño corto a mediano, siempre que se optimice la ubicación del gateway y se utilicen repetidores en zonas críticas. La pequeña minería, en la que establecer infraestructura por cable puede resultar costoso o inviable, se beneficiaría especialmente de este estudio. El LoRaWAN es una red de comunicación que se construye sobre el LoRa. El sistema sugerido en esta investigación es, ante todo, inalámbrico. (sensores → gateway → servidor → supervisor).

Para las alarmas locales y la alimentación, solo se utiliza cableado en los puntos más críticos. Esto lo vuelve más factible y asequible para la minería subterránea de pequeña escala, en donde son claves el bajo costo y la movilidad.

De igual manera, Cacciuttolo et al. (2024) realizaron un análisis de la viabilidad de LoRaWAN en minas subterráneas, explorando tanto las aplicaciones reales como los ensayos experimentales. La revisión enfatiza que LoRaWAN es una tecnología adecuada para las

operaciones con restricciones presupuestarias debido a que su consumo de energía es bajo y permite la adición de sensores inteligentes a costos asequibles. El análisis destaca que esta tecnología es capaz de operar con eficacia en entornos geológicos complejos, siempre y cuando la topología de la red sea diseñada apropiadamente. Este aporte respalda la elección de LoRaWAN como mecanismo de transmisión económica y robusta en la presente tesis.

Un estudio aplicado de ResearchGate (2022) que investigó el sistema RTEPMS (Sistema de Extensión de Rango para la Vigilancia de Parámetros Ambientales) incorporó sensores de otros gases, así como de O_2 y CO, en una mina subterránea mediante tecnología LoRa extendida. Los resultados apuntan a que los valores que recogen los sensores de bajo costo y los detectores comerciales certificados, en particular en el caso del monóxido de carbono, están fuertemente correlacionados. Además, el análisis indica circunstancias en las que el metano no representa una amenaza significativa, lo que apoya la idea de priorizar la medición del CO y O_2 en minas metálicas de menor tamaño, como se plantea en esta investigación.

Otro estudio significativo es el que trata sobre la implementación de un sistema IoTLoRa para el monitoreo del medio ambiente en minas subterráneas (García, Rodríguez y Molina, 2023) En este, se creó un prototipo funcional que incluía nodos transmisores, sensores y una plataforma de alertas. El sistema demostró ser bastante estable, tener un consumo bajo y una precisión adecuada al detectar cambios en la atmósfera. Este trabajo establece un precedente directo acerca de la manera en que se pueden incorporar sensores electroquímicos a un sistema liviano, replicable y apropiado para pequeños frentes de trabajo, confirmando así la factibilidad técnica de lo que se propone en esta tesis.

A escala regional, un estudio realizado en Perú (Quispe y Huamán, 2023) detectó la concentración de monóxido de carbono y otros gases en entornos de riesgo usando dispositivos

portátiles, lo cual evidenció la relevancia de tener registros permanentes para examinar correlaciones y patrones temporales. A pesar de que no fue específicamente desarrollada en minería subterránea, el método utilizado para la calibración, verificación y registro de datos puede ser aplicado al proceso de prevención de accidentes.

Por último, un informe técnico de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC, 2023) examina la eficacia de los sensores económicos para detectar CO y otros gases, considerando factores como el tiempo de respuesta, la duración de las celdas electroquímicas y las tácticas para calibrar. El informe concluye que, si bien los sensores de bajo costo requieren mantenimiento periódico, son una alternativa confiable y accesible para aplicaciones industriales con presupuesto limitado.

En su totalidad, estas investigaciones muestran que los sistemas de monitoreo ambiental con sensores inteligentes y tecnologías inalámbricas de bajo consumo son una opción viable, asequible y que se puede reproducir en áreas donde la minería subterránea es pequeña.

Además, evidencian que los sensores seleccionados (CO y O_2) son adecuados para prevenir eventos asociados a atmósferas peligrosas, lo cual apoya técnicamente el diseño experimental y la implementación realizada en esta investigación.

2.1.1 Antecedentes de la investigación

En nuestro país se han reportado varios accidentes provocados por atmósferas peligrosas siendo la falta de oxígeno y la presencia del monóxido de carbono los gases de mayor prevalencia en caso de reportes de accidentes fatales. El accidente que ocurrió el 6 de mayo de 2023 en La Esperanza, Compañía Yanaquihua Mining Company S.A.C. es un lamentable ejemplo de los peligros a los que se enfrentan día a día los mineros que desempeñan labores subterráneas. En la última década, en nuestro país este hecho se volvió uno de los peores desastres mineros subterráneos, con 27 trabajadores fallecidos. De acuerdo con los reportes

preliminares del Ministerio de Energía y Minas, el siniestro se produjo por un incendio en una galería subterránea, generado por la combustión de madera y cables, lo que provocó la acumulación crítica de monóxido de carbono (CO) dentro de las labores. La investigación indicó que las cuadrillas de trabajo quedaron expuestas a concentraciones letales de CO debido a la insuficiente ventilación y a la falta de sistemas de monitoreo continuo de gases que permitieran alertar tempranamente sobre la atmósfera peligrosa.

Este caso demuestra que las operaciones de pequeña y mediana escala son vulnerables, ya que la infraestructura de ventilación es escasa y el monitoreo del entorno no siempre tiene instrumentos electrónicos que puedan identificar cambios nocivos en el CO o el O_2. El suceso de Yanaquihua demuestra que la ausencia de sistemas de alerta y sensores inteligentes en tiempo real puede resultar en muertes, lo que valida la importancia de implementar sistemas para monitorear gases como los utilizados en este estudio.

Los sistemas de ventilación en minería subterránea muestran cuán importante es el monitoreo constante, ya que permite una detección temprana y una reacción rápida frente a alteraciones en la atmósfera. Sin embargo, las pequeñas unidades mineras presentan brechas en cuanto a equipamiento y monitoreo debido a limitaciones técnicas y económicas, lo que fundamenta la investigación aplicada en este campo.

Diversas investigaciones han evidenciado que es esencial implementar sistemas de monitoreo ambiental con sensores inteligentes en la minería subterránea, especialmente en circunstancias donde la falta de oxígeno y la aparición de monóxido de carbono representan graves riesgos para la seguridad del personal. En esta línea, los investigadores Martínez y López (2020) desarrollaron un método para detectar monóxido de carbono mediante sensores electroquímicos asequibles, lo cual demuestra que dicho sistema es capaz de ofrecer respuestas veloces en caso de que el CO aumente peligrosamente en las galerías mineras. Los hallazgos

demuestran que el uso de sensores económicos no afecta la sensibilidad ni la exactitud, lo que los hace opciones factibles para las operaciones de pequeña minería.

Rojas, Torres y Delgado (2021) evaluaron además el rendimiento de los sensores portátiles de oxígeno en minas subterráneas medianas, confirmando que estos instrumentos sostienen lecturas estables a pesar de la presencia de polvo y humedad elevada. Los autores llegaron a la conclusión de que los sensores que se basan en tecnología galvánica son apropiados para identificar descensos de oxígeno en áreas de avance. Esto justifica la conveniencia de establecer sensores fijos en frentes mineros donde hay un riesgo más elevado de hipoxia.

Además, investigaciones como la de Santos y Herrera (2019) evidenciaron la efectividad de las redes inalámbricas con poco consumo energético, por ejemplo, LoRaWAN, para enviar de manera constante datos medioambientales en túneles. Su investigación mostró que estas redes operan de manera óptima en espacios reducidos y posibilitan disminuir considerablemente los costos de instalación en comparación con sistemas cableados convencionales.

Estudios realizados en la región La Libertad desarrollo una evaluación minuciosa acerca de la presencia de gases contaminantes en operaciones mineras subterráneas usando sensores portátiles de O_2 y CO, dicho estudio, mostro que la deficiente ventilación incrementa los riesgos operacionales. (Rojas & Medina, 2021). Este antecedente nos brinda información acerca de la importancia de implementar sistemas automatizados con monitoreos permanentes y continuos con el objetivo de identificar atmósferas peligrosas y tomar medidas preventivas adecuadas, dicho estudio coincide con la propuesta realizada para el desarrollo del presente trabajo de investigación.

Un trabajo de investigación aplicado en minas del sur del Perú realizó un trabajo de investigación con el objetivo de evaluar la calidad del aire y nivel de oxígeno presente en minería artesanal y pequeña minería, el trabajo fue desarrollado con el objetivo de medir la concentración de gases producto de la combustión de equipos móviles dentro de espacios confinados, en dicho trabajo de investigación se identificó al monóxido de carbono como uno de los gases más peligrosos y críticos que afecta no solo el rendimiento del personal, lo más crítico es que provoca asfixia producto del aislamiento de glóbulos rojos que provoca el monóxido de carbono. La investigación evidenció que, incluso en operaciones pequeñas, los niveles de CO pueden superar los límites establecidos por DS-024-2016-EM, especialmente en minas subterráneas con deficiente ventilación (Quispe & Valverde, 2022). Dicho estudio destaca además la importancia de implementar tecnologías viables y adaptables de acuerdo con la operación minera, tal como lo plantea el presente proyecto de investigación.

En una mina subterránea de Puno, se probó un sistema piloto de sensores económicos integrados mediante IoT para medir variables ambientales, demostrando que la red inalámbrica de bajo consumo puede funcionar de manera eficiente en operaciones mineras de pequeña escala. La presente investigación fue desarrollada con la convicción de que la detección temprana y la transmisión inmediata a los sistemas de soporte del ensamble de sensores identificando las alertas, su aplicación redujo significativamente los incidentes relacionados con la ventilación (Torres, Huamán & Cárdenas, 2023). Este antecedente confirma la viabilidad técnica y operativa de implementar sistemas inteligentes en operaciones de pequeña escala.

En una mina de carbón ubicada en China se desarrolló un trabajo de investigación referido a la implementación sistema de monitoreo a tiempo real basado en LoRaWAN para O_2, CO. El sistema implementado logró mantener conectividad estable a más de 250 metros de profundidad. Además, dicho proceso ajustado a un sistema de respuesta automático identifico atmósferas peligrosas mediante la identificación de eventos críticos (Li et al., 2023). Este

trabajo se relaciona y constituye una base de estudio para la propuesta del trabajo de investigación realizado, sobre todo por su aplicación de sensores electroquímicos y nodos inalámbricos.

Un estudio realizado en Polonia, referido a la detección automatizada de monóxido de carbono en ambientes confinados, analizó la eficacia de sensores electroquímicos de CO en túneles, señalando que los sistemas fijos superan ampliamente a los detectores portátiles en precisión, continuidad del registro y tiempo de reacción. La investigación concluyó que la instalación estratégica de sensores reduce hasta en 60% los eventos de exposición prolongada (Kowalski & Nowak, 2021). Este antecedente respalda la decisión de reemplazar la medición manual por un sistema automatizado de monitoreo permanente.

En una mina en Canadá, una investigación referida a la seguridad ocupacional y monitoreo de oxígeno en minería metálica realizó un estudio acerca del impacto generado con el uso de sensores fijos de O_2 en minas metálicas subterráneas, dando como evidencia que los trabajos desarrollados en zonas críticas contribuyen con la probabilidad de generar hipoxia en operaciones mineras que usan equipos a combustible (McArthur & Barnes, 2020). Este estudio contribuye con bases científicas que demuestras la eficiencia de los sensores inteligentes en la prevención de intoxicaciones y sistemas de ventilación deficientes.

2.2 Hipótesis

Es probable, que la implementación de un sistema de monitoreo ambiental en un frente piloto usando sensores inteligentes para la detección del oxígeno y el monóxido de carbono podría mejorar las condiciones operativas y las condiciones de seguridad en una minería subterránea a pequeña escala.

2.2.1 Variable independiente

- Calidad del sensor de oxígeno (O_2)
- Calidad del sensor de monóxido de carbono (CO)
- Instalación y funcionamiento del sistema
- Mantenimiento básico requerido
- Costo de implementación

2.2.2 Variable independiente

- Condiciones atmosféricas
- Detección temprana de condiciones peligrosas
- Acciones preventivas generadas

Tabla 1
Operacionalización de variables

Tipo de variable	Variable	Subindicadores	Instrumentos
Variable Independiente	Calidad del sensor de oxígeno (O_2)	Rango operativo; precisión de medición; tiempo de respuesta	Ficha técnica del sensor
	Calidad del sensor de monóxido de carbono (CO)	Límites de detección; tiempo de respuesta	Ficha técnica del sensor
	Instalación y funcionamiento del sistema	Arquitectura del sistema	Lineamientos del sistema
	Mantenimiento básico requerido	Frecuencia de calibración	Ficha técnica
	Costo de implementación	Costo total del sistema	Análisis de costos
	Condiciones atmosféricas seguras	Niveles de O_2 dentro de rango seguro (≥19.5%); concentración de CO bajo límites permisibles (	Registro de datos recolectados del sistema
Variable dependiente	Detección temprana de condiciones peligrosas	Frecuencia de alarmas; tiempo de aviso; confiabilidad del sistema	Registro de datos
	Acciones preventivas generadas	Número de intervenciones oportunas; medidas aplicadas tras las alertas	Registros de seguridad

Nota: Tipo de variables aplicado en la tesis que tiene como un monitoreo con sensores para la medición de monóxido de carbono y oxígeno.

CAPÍTULO III

3 ALCANCES Y LIMITACIONES

3.1 Alcances

El estudio presenta ciertas restricciones que surgen de la naturaleza de las investigaciones llevadas a cabo en contextos operativos reales. En primer lugar, a causa de limitaciones presupuestarias, solamente se incluye en el monitoreo dos gases: el oxígeno (O_2) y el monóxido de carbono (CO), omitiendo la medición de otras sustancias que podrían ser riesgosas, como por ejemplo el metano (CH_4), el dióxido de azufre (SO_2) o el dióxido de nitrógeno (NO_2). Esta delimitación se fundamenta en la situación real de la pequeña minería subterránea evaluada, donde estos otros gases tienen una baja frecuencia; sin embargo, esto también disminuye el alcance del monitoreo medioambiental.

El sistema que se ha puesto en marcha está concebido para ser operacionalmente factible, económicamente asequible y tecnológicamente simple, con el objetivo de ajustarse a las restricciones habituales de la pequeña minería. El alcance comprende el seguimiento de los parámetros de seguridad más relevantes que afectan la calidad del aire respirable, como los niveles de O_2 y CO, ya que estos gases tienen un impacto significativo en los incidentes históricos documentados en minas con condiciones parecidas.

Además, se incluye en la investigación la comparación entre la línea base, que es el registro de gases previo a la implementación del sistema, y una medición posterior a dicha implementación. Para ello se toman en cuenta indicadores como el nivel de concentración de gases en el frente modelo, detección de eventos críticos y número de alertas. El objetivo de los resultados logrados es crear un modelo que pueda ser replicado en otros niveles y frentes dentro de operaciones subterráneas similares.

3.2 Limitaciones

El estudio presenta ciertas limitaciones que surgen de las características propias de los trabajos de investigación desarrollados, dentro de esas restricciones se encuentra el factor económico, las restricciones presupuestarias en procesos de implementación de infraestructura y en este caso específicamente en el proceso de implementación de sensores para monitorear sólo dos gases (oxígeno y monóxido). Esta delimitación se fundamenta en la situación real de la pequeña minería subterránea evaluada, donde estos otros gases tienen una baja frecuencia; sin embargo, esto también disminuye el alcance del monitoreo medioambiental.

En segundo lugar, la implementación se lleva a cabo en un frente modelo, que ha sido elegido por sus rasgos representativos. No obstante, los resultados pueden ser distintos en otros frentes con geometrías diferentes, condiciones específicas de ventilación o patrones operacionales particulares. Por lo tanto, a pesar de que el sistema es replicable, los descubrimientos no pueden extrapolarse automáticamente a todas las tareas de la unidad sin modificaciones o estudios previos.

Finalmente, por motivos operativos, no se analizan las fluctuaciones estacionales que surgen a lo largo del año. Finalmente, el funcionamiento del sistema depende de condiciones básicas de la infraestructura minera como disponibilidad de energía, integridad de los cables o estabilidad del flujo de aire, elementos que pueden variar y afectar la continuidad de los registros.

No obstante, estas restricciones en el estudio ofrecen evidencias prácticas y técnicas que son suficientes para mostrar la conveniencia, utilidad y la factibilidad de aplicar sensores de CO y O_2 como una práctica eficaz para incrementar la seguridad en la minería subterránea a pequeña escala.

3.3 Tipo y nivel de investigación

3.3.1 Tipo de investigación

De acuerdo con la identificación del problema, el planteamiento del problema y la determinación de los objetivos generales y específicos, así como la hipótesis, nos muestran un trabajo de investigación del tipo aplicado.

Su objetivo principal no es solamente crear conocimiento, sino también aplicar el conocimiento existente para planear e implementar un sistema de monitoreo ambiental que se basa en sensores inteligentes de oxígeno (O_2) y monóxido de carbono (CO), con el propósito de optimizar las condiciones de seguridad en un frente modelo. En esa línea, la investigación genera un aporte práctico que puede ser utilizado directamente por las operaciones mineras de similares características.

3.3.2 Nivel de investigación

El presente trabajo de investigación es de tipo descriptivo-explicativo. Es descriptiva ya que se destaca por registrar y examinar las condiciones iniciales de la calidad del aire (línea base), la distribución de ventilación, el comportamiento de los gases monitoreados y el rendimiento del sistema implementado dentro del frente escogido. Además, los indicadores técnicos obtenidos en el frente modelo indican que los sensores electroquímicos de O_2 y CO tienen tiempos de detección rápidos, por debajo de 10 segundos, lo cual posibilita la activación inmediata de sistemas de purga y alarmas. La continuidad operacional a lo largo de la jornada está asegurada, ya que el sistema se sostiene por encima del 95% con la comunicación inalámbrica LoRaWAN y el soporte eléctrico local.

Asimismo, el recuento de alertas registradas se ajusta a los límites fijados ($O_2 < 19.5$ % y CO > 50 ppm), lo que genera advertencias oportunas que reducen sucesos imprevistos y mejoran la seguridad en el frente de avance.

Además, el estudio es explicativo porque busca determinar cómo la implementación del sistema de monitoreo afecta la mejora de las condiciones para la seguridad operacional.

Se muestra, a través del diseño cuasiexperimental, de qué manera la instalación de sensores inteligentes contribuye a reconocer las atmosferas peligrosas, lo cual permite reducir la exposición del equipo a niveles críticos de CO y O_2. Esta dimensión explicativa permite identificar relaciones de causa y efecto entre la intervención tecnológica y los cambios observados en los índices de seguridad.

3.4 Población y muestra

3.4.1 Población

La población de estudio incluye todos los trabajos operativos y activos de la unidad minera subterránea a pequeña escala que se encuentra ubicada en la zona de La Libertad, especialmente aquellos asociados con actividades de avance, extracción y tareas auxiliares que requieren la presencia constante de trabajadores y máquinas que emiten gases. Esta población abarca las diversas galerías, frentes, chimeneas y niveles en los cuales la ventilación natural o forzada puede presentar variaciones que afecten la concentración de oxígeno (O_2) y monóxido de carbono (CO).

3.4.2 Muestra

La muestra está compuesta por un frente modelo de trabajo, que fue elegido por su representatividad operativa y porque cuenta con condiciones de saturación ambiental debido a la presencia de gases o a la escasa ventilación, el paso constante de empleados y el empleo de equipos diésel.

Este frente posibilita la evaluación del rendimiento del sistema de monitoreo en un contexto real, que supone una gran exigencia operativa y tiene un riesgo potencial de

acumulación de CO o escasez de O_2. Los puntos concretos del frente donde se colocan los sensores escogidos también forman parte de la muestra.

Figura 1
Identificación de la zona de estudio



Nota: La zona de estudio son las galerías de trabajo permanentes.

3.5 Método, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

3.5.1 Procedimiento y técnica de recolección de datos

Para analizar el desempeño del sistema de monitoreo ambiental con sensores inteligentes y las alteraciones en las condiciones atmosféricas internas de la mina antes y después de implementar los sensores en el frente modelo, se llevó a cabo un procedimiento con enfoque cuantitativo para recolectar datos utilizando métodos experimentales y descriptivos en base a las variables identificadas.

3.5.2 Técnicas de recolección de datos

La recolección de datos se realiza en dos etapas:

Línea base (Pre-Implementación)

Los niveles de CO y O_2 fueron medidos durante tres meses con equipos convencionales. Estos registros hicieron posible que se evaluaran las condiciones iniciales de la atmósfera en varias secciones, con el objetivo de evaluar la variabilidad típica de ambos gases bajo diferentes turnos y condiciones operativas.

Implementación y monitoreo continuo

Con la puesta en marcha del sistema de sensores inteligentes, los datos se recogen automáticamente y sin interrupciones, almacenándose en un módulo local, es ahí donde se recopilan indicadores tales como:

- Tiempos de detección: Los sensores electroquímicos de CO y O_2 responden en menos de 10 segundos, lo cual posibilita la activación instantánea de alarmas y sistemas de purga.
- Disponibilidad del sistema: Superior al 95 %, lo que se debe a la comunicación LoRaWAN sin cables y a la protección eléctrica en los nodos críticos mediante UPS.
- Sistema de alertas: Directamente relacionada con los umbrales establecidos tanto para el oxígeno como para el monóxido de carbono ($O_2 < 19.5$ % y CO > 50 ppm).
- Registro de alertas: Son las lecturas diarias mínimas, máximas y promedio registradas por el sistema instalado • Integridad de la red: Funcionamiento

óptimo y adecuado permanentemente monitoreado de los frentes piloto P1, P2 y P3.

3.5.3 Plan de análisis estadístico de los datos

Se emplea un muestreo no probabilístico de tipo intencional, debido a que la selección del frente modelo se realiza con base en criterios técnicos y de seguridad. Los criterios utilizados para su elección incluyen:

- Frecuencia de ingreso de trabajadores.
- Presencia de equipos diésel o fuentes de combustión.
- Condiciones de ventilación representativas de la operación.
- Accesibilidad para la instalación y mantenimiento de sensores.
- Pertinencia operativa para replicación futura en otros frentes.

Este método permite seleccionar la labor que mejor representa las condiciones de riesgo atmosférico más crítica de la explotación minera subterránea a pequeña escala.

3.6 Lugar de desarrollo de investigación

La investigación se lleva a cabo en una unidad de minería subterránea pequeña escala situada en la provincia de Trujillo, dentro de la región La Libertad, Perú. Las mediciones se llevaron a cabo en un frente operativo específico, elegido como frente modelo, en el que se instalaron los sensores para su monitoreo y registro de las condiciones atmosféricas durante la totalidad del periodo de estudio.

3.6.1 Ubicación temporal

El presente trabajo de investigación fue desarrollado en el año 2024 y estuvo delimitado en dos fases:

- Periodo 1 (línea base): enero – marzo 2024
- Periodo 2 (instalación, calibración y monitoreo): abril – junio 2024

3.7 Requisitos del sistema a implementar

- **Tipo de sensor:** Electroquímico para O_2 (celda galvánica) y CO (celda electroquímica), por su sensibilidad en bajas concentraciones y bajo consumo.
- **Rango y precisión:**
  - O_2: 0–25% vol, precisión ±0.2% vol, T90 ≤ 10 s.
  - CO: 0–200 ppm, precisión ±2 ppm o ±5% de lectura, T90 ≤ 10 s.
- **Certificación:** Intrínsecamente seguro (ATEX/IECEx Zona 1) y carcasa IP65–IP67 para polvo/humedad**.**
- **Calibración:** Calibración de dos puntos (span y cero), verificación mensual y ajuste trimestral; gases patrón trazables.
- **Temperatura y humedad:** Operación estable en 0–40 °C y 10–95% HR no condensante.
- **Alimentación y comunicación:**
  - Alimentación: 12–24 VDC o batería con respaldo; protección contra inversión y sobrecarga.
  - Comunicación: LoRaWAN para largo alcance y baja potencia; gateway en P1 con backhaul (Ethernet/4G).

- **Alarmas:** Umbrales configurables con lógica de persistencia (p. ej., 10–30 s) para evitar falsos positivos:
    - O_2: Advertencia < 20.5%, Alarma < 19.5%, Emergencia < 18.0%.
    - CO: Advertencia > 25 ppm, Alarma > 50 ppm, Emergencia > 100 ppm.

3.8 Implementación del sistema

3.8.1 Puntos de monitoreo

Punto P1: Bocamina

- **Equipo:** Nodo combinado O_2 + CO
- **Montaje:** 1.8 m sobre el piso (altura respiratoria en ingreso)

Propósito: Vigilancia del aire que entra, detección temprana de gases que entran o retroalimentan la galería; ubicación adecuada para instalar el Gateway. El gateway LoRaWAN que se encuentra en la bocamina (P1) actúa como un punto central para la recepción y transmisión de datos, integrando las mediciones de los sensores electroquímicos de CO y O_2 al sistema de supervisión en superficie. Al estar ubicado en la bocamina, permite el acceso a la energía eléctrica y al aire entrante, lo que lo convierte en el lugar perfecto para manejar la red inalámbrica.

Punto P2: Galería tramo inicial (0–150 m)

- **Equipo:** Nodo CO
- **Montaje:** 1.5 m sobre el piso

Objetivo: Detección de emisiones puntuales debido al tránsito de equipos diésel; cobertura de tramo inicial hasta el frente.

Punto P3: Galería de avance principal

- Equipo: Nodo combinado O_2 + CO
- Montaje: 1.3 m sobre el piso (zona respiratoria cercana al trabajador)

Objetivo: protección directa del personal en el frente; detección inmediata en la zona de trabajo.

3.8.2 Configuración por puntos

Punto P1: Bocamina (control de aire entrante y gateway).

- **Equipo principal:**
  - Sensor combinado O_2 + CO electroquímico en módulo fijo con display local y relés.
  - Gateway LoRaWAN con antena externa y alimentación estable (UPS) para cubrir la galería.
- **Montaje:**
  - **Altura:** 1.8 m sobre el piso (zona respiratoria a la entrada).
  - **Ubicación:** Flujo de aire entrante, evitando recirculaciones; distancia segura de fuentes de escape.
- **Funciones clave:**
  - Detección temprana de retroalimentación de gases.
  - Gestión de red: alta disponibilidad del gateway, mapeo de RSSI/SNR hacia P2 y P3.
  - Alarmas locales: baliza y sirena; notificación al supervisor.
- **Especificaciones recomendadas:**

- Rango O_2: 0–25% vol, T90 ≤ 15 s.
- Rango CO: 0–200 ppm, T90 ≤ 30 s.
- Certificación: ATEX/IECEx, IP65–IP67.
- Salida: LoRaWAN + relés (advertencia/alarma).

Punto P2: Galería tramo inicial (emisiones diésel)

- **Equipo principal:**
  - Sensor CO electroquímico en nodo compacto de bajo consumo.
- **Montaje:**
  - **Altura:** 1.5 m sobre el piso, cerca de la altura respiratoria.
  - **Ubicación:** Tramo 0–150 m; separar 2–3 m de escapes de equipos para evitar lecturas saturadas.
- **Funciones clave:**
  - **Detección de picos de CO por tránsito de equipos diésel:** envío de alertas tempranas.
  - **Lógica antirruido:** promedios móviles y tiempo mínimo de persistencia (p. ej., 10 s) antes de activar alarma.
- **Especificaciones recomendadas:**
  - Rango CO: 0–200 ppm, resolución 1 ppm.
  - **Certificación:** ATEX/IECEx, IP65–IP67.
  - **Salida:** LoRaWAN hacia gateway P1; relé opcional para baliza local.

Punto P3: Frente de avance principal (protección directa al personal)

- **Equipo principal:**
  - Sensor combinado O_2 + CO electroquímico con actuación local (purga/ventilador).
- **Montaje:**
  - **Altura:** 1.3 m sobre el piso, muy cercano a la zona respiratoria del trabajador.
  - **Ubicación:** En el frente, protegido contra impactos y agua; usar deflector y malla protectora.
- **Especificaciones recomendadas:**
  - Rango O_2: 0–25% vol.
  - Rango CO: 0–200 ppm.
  - Certificación: ATEX/IECEx, IP65–IP67.
  - Salida: LoRaWAN + relés para ventilación y balizas.

Tabla 2
Resumen técnico por punto

Punto	Tipo de nodo	Gases	Altura (montaje)	Comunicación	Alarmas locales	Actuación
P1 Bocamina	Combinado fijo	O_2, CO	1.8 m	LoRaWAN + Gateway	Baliza/sirena	Relés para ventilación general

Punto	Tipo de nodo	Gases	Altura (montaje)	Comunicación	Alarmas locales	Actuación
P2 Galería 0-100 m	Nodo compacto	CO	1.5 m	LoRaWAN	Baliza opcional	Relé opcional
P3 Frente de avance 200 m	Combinado con actuación	O_2, CO	1.3 m	LoRaWAN	Baliza/sirena alta	Relés para purga local

Nota. Descripción de la operación de las alertas: cada nodo analiza el O_2 y el CO en comparación con límites establecidos con persistencia temporal (10-30 s). Cuando el nodo sobrepasa el umbral, manda un evento a través de LoRaWAN al gateway en P1, que lo registra y lo notifica. Los relés locales, a la vez, ponen en funcionamiento las sirenas/balizas y purgan el aire en P3. El sistema almacena sucesos con marca temporal, duración y valor máximo, lo que posibilita el análisis de tendencias y la respuesta operativa.

3.9 Operación y mantenimiento del sistema

Calibración y verificación:

- **O_2:** Verificación mensual, calibración quincenal con aire 20.9% y gas cero.
- **CO:** Verificación mensual, calibración quincenal con 50–100 ppm CO con gas patrón

3.10 Sensores evaluados para su implementación

MSA Altair 4XR Mining (O_2 + CO + otros gases)

- **Características:**

- Sensores XCell® para O_2 y CO con respuesta rápida.
- Certificación para minería subterránea, intrínsecamente seguro.
- Resistente a golpes, polvo y humedad (IP67).
- Alarmas sonoras, visuales y vibratorias.
- Compatible con sistemas de calibración rápida y comunicación inalámbrica.

- **Ventajas para pequeña minería:**
  - Portátil y fácil de usar en frentes de trabajo.
  - Bajo costo de mantenimiento (menos gas de calibración).
  - Puede integrarse como nodo combinado en P1 y P3.

Figura 2
Detector MSA Altair 4XR Mining



Nota. Sensor de detección de gases MSA Altair 4XR Mining

Sensores electroquímicos de bajo costo con LoRaWAN

- **Características:**
    - Diseñados para proyectos de monitoreo ambiental en minería.
    - Comunicación inalámbrica de largo alcance (LoRaWAN).
    - Bajo consumo energético, ideales para nodos fijos en galerías.
- **Ventajas para pequeña minería:**
    - Económicos y escalables.
    - Perfectos para P2 (solo CO) y como red de apoyo en galerías.

Sistemas integrados de sensores para minería subterránea

- **Características:**
    - Redes de sensores que permiten monitoreo en tiempo real.
    - Integración con software de gestión de seguridad.
    - Alertas automáticas y reportes históricos.
- **Ventajas para pequeña minería:**

- Replicable en otros niveles y/o frentes de acuerdo a sus características

Tabla 3
Matriz de decisión de sensores O_2 + CO

Opción	Tipo de sensor	Costo relativo	Durabilidad	Facilidad de integración	Adecuación a pequeña minería	Observación
MSA Altair 4XR Mining	Detector portátil multigás (O_2, CO, otros)	Medio – Alto	Muy alta (IP67, resistente golpes)	Alta (compatible con sistemas de calibración y alarmas)	Excelente	Ideal para puntos críticos (P1 y P3). Certificado para minería, confiable y seguro
Sensores electroquímicos LoRaWAN	Nodos fijos O_2/CO con comunicación IoT	Bajo–Medio	Media (requiere protección física)	Muy alta (LoRaWAN, bajo consumo, escalable)	Muy buena	Perfectos para galerías largas como P2. Económicos y fáciles de ampliar.
Sistemas integrados de monitoreo minero	Redes de sensores con software de gestión	Alto	Alta	Media (requiere infraestructura y capacitación)	Buena	Adecuados para operaciones grandes. En pequeña minería puede ser costoso y complejo.

Nota. Opciones de decisión de sensores de monitorio de detección de gases.

3.11 Sistema de red de sensores y flujos de alerta

3.11.1 Componentes principales

- **P1 Bocamina (nodo combinado O_2+CO + gateway LoRaWAN)**
  - **Sensor:** O_2 (0–25%) y CO (0–200 ppm), electroquímico.
  - **Gateway:** LoRaWAN con backhaul Ethernet/4G, UPS local.
  - **Alarmas locales:** baliza/sirena.
  - **Funciones:** control de aire entrante, recepción de datos de P2 y P3, reenvío a servidor.
- **P2 Galería inicial (nodo CO)**
  - **Sensor:** CO electroquímico, 1.5 m sobre el piso.
  - **Conexión:** enlace LoRaWAN hacia gateway de P1 (≈100–150 m).
  - **Alarmas locales:** baliza opcional.
  - **Funciones:** detección de picos por tránsito diésel; alertas tempranas.
- **P3 Frente de avance (nodo combinado O_2+CO + purga automática)**
  - **Sensor:** O_2 y CO, 1.3 m sobre el piso.
  - **Conexión:** LoRaWAN hacia gateway de P1 (≈200 m).
  - **Actuación local:** relé para activar ventilador/purga.
  - **Alarmas locales:** baliza/sirena de alta potencia.

3.11.2 Flujo de datos y alertas

Medición local: cada nodo toma lecturas cada 5–10 s.

Evaluación de umbrales con persistencia: 10–30 s para evitar falsos positivos.

Eventos y transmisión:

- Si se supera un umbral, el nodo genera un evento y lo envía por LoRaWAN al gateway en P1.
- El gateway registra y reenvía al servidor/PC del supervisor.

Acciones automáticas:

- P3: activa purga local si CO > 25 ppm o O_2 < 19.5%.
- P1: puede activar ventilación general si se detecta retroalimentación de gases.

Notificaciones:

- Alarmas locales con balizas/sirenas en P1 y P3.
- Mensajes al supervisor (PC/Tablet) con georreferencia del punto y nivel de alarma.

Lógica de alarmas recomendada

En caso O_2

- Advertencia: < 20.5%.
- Alarma: < 19.5%.
- Emergencia: < 18.0%.

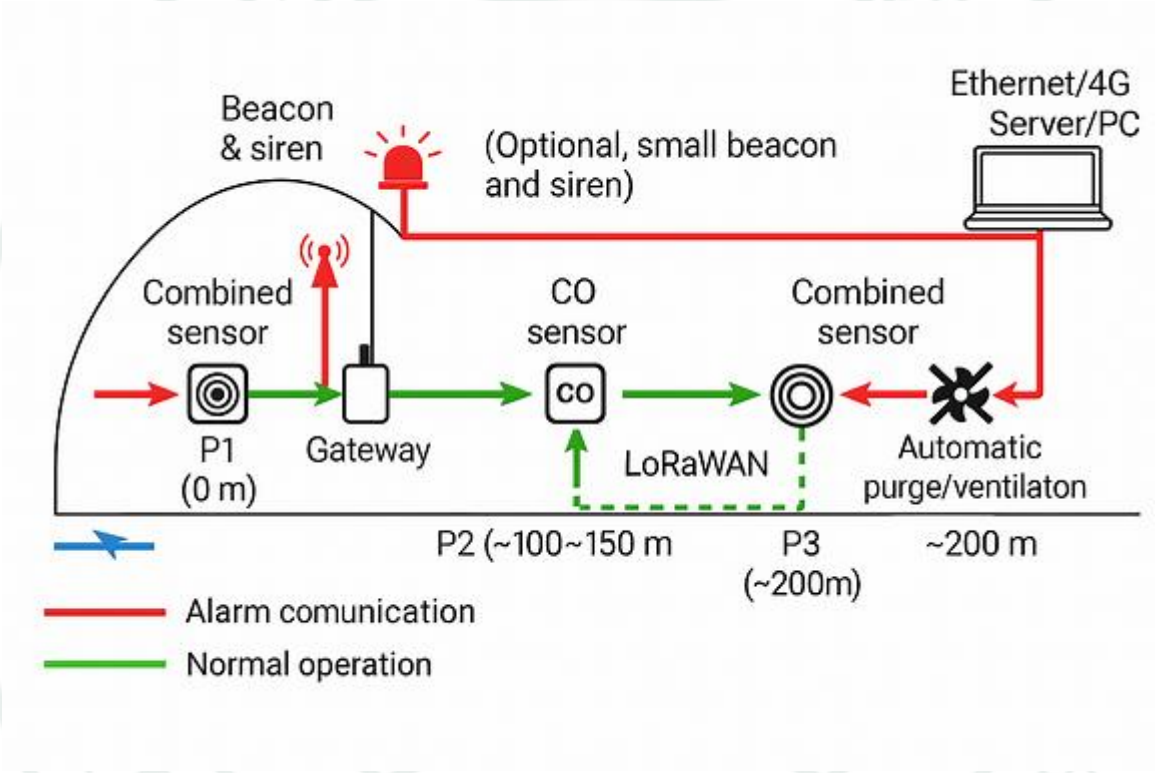
En caso CO

- Advertencia: > 25 ppm.

- Alarma: > 50 ppm.
- Emergencia: > 100 ppm.

Cada evento almacena: punto (P1/P2/P3), valor pico, duración, hora y acciones ejecutadas (baliza, purga, ventilación general).

Figura 3
Arquitectura funcional del sistema de monitoreo



Nota. Esquema de sistema de monitoreo.

La **Figura *3*** se muestra, la arquitectura funcional del sistema de monitoreo ambiental instalado en una operación de pequeña minería subterránea (línea azul, dirección del flujo de aire desde la bocamina hacia el frente, línea roja ruta de alerta si se superarán los umbrales, línea verde señala transmisión de señal segura y funcionamiento correcto.

El túnel horizontal está dividido en tres puntos estratégicos:

P1 – Bocamina (0 m)

- **Sensor combinado O_2 + CO:** mide gases respirables y tóxicos en el ingreso.
- **Gateway LoRaWAN:** recibe datos inalámbricos desde los sensores en P2 y P3.
- **Baliza/sirena:** se activa ante condiciones críticas (CO > 25 ppm o O_2 < 19.5%).
- **Conexión a servidor/PC:** transmite datos al sistema de monitoreo en superficie vía Ethernet o 4G.

P2 – Galería en el primer tramo (aproximadamente 100–150 m)

- **Sensor de CO (Dragino LAQ4):** controla las emisiones de las máquinas que funcionan con diésel.

3.12 Funcionamiento del sistema de monitoreo

Medición continua: cada nodo registra O_2 y/o CO cada 10 segundos.

Evaluación de umbrales:

- O_2: advertencia < 20.5%, alarma < 19.5%, emergencia < 18.0%.
- CO: advertencia > 25 ppm, alarma > 50 ppm, emergencia > 100 ppm.

Acciones automáticas:

- En **P3**, se activa purga local (ventilador auxiliar) si CO > 25 ppm o O_2 < 19.5%.
- En **P1**, el gateway puede activar ventilación general si detecta retroalimentación de gases.

Notificación al supervisor: el gateway transmite los datos al servidor/PC, registrando hora, punto, valor máximo y duración del evento.

3.13 Reportes de eventos antes y después de la implementación del sistema

Antes de la implementación del sistema de monitore en los tres puntos de monitoreo (P1, P2, P3) en un periodo de 30 días de operación. Se reportaron alarmas por nivel, identificación de rangos de valores registrados y un reporte de accidentes.

Escenario y umbrales de referencia

- **Umbrales O_2:** Advertencia < 20.5%, Alarma < 19.5%, Emergencia < 18.0%.
- **Umbrales CO:** Advertencia > 25 ppm, Alarma > 50 ppm, Emergencia > 100 ppm.
- **Frecuencia de muestreo:** cada 10 s; alarmas con persistencia de 20 s.
- **Periodo simulado:** 30 días; operación diaria 10 h (turnos cortos típicos de pequeña minería).

Los eventos reportados se notificaron como incidentes operativos, dichas alarmas obligaron a detener trabajos y/o evacuar el área, sin detallar aspectos sensibles. La reducción se atribuye a detección temprana, purga automática y mejor ventilación.

Tabla 4
Resumen de alarmas y valores registrados antes de la implementación

Punto	Alarmas O_2	Rango O_2 observado	Alarmas CO	Rango CO observado	Incidentes
P1 Bocamina	20	17.8% – 20.3%	27	26 – 118 ppm	1
P2 Galería 0–150 m	33	17.6% – 20.1%	50	27 – 145 ppm	6
P3 Frente avance	41	17.5% – 20.2%	61	29 – 160 ppm	8

Nota. El CO presenta picos frecuentes por tránsito de equipos diésel, con varias emergencias > 100 ppm en P2 y P3, el O_2 se mantiene por debajo de 19.5% en múltiples

jornadas, especialmente en el frente (P3). Los incidentes se concentran donde hay mayor acumulación de gases y menor renovación de aire.

Tabla 5
Resumen de alarmas y valores registrados después de la implementación

Punto	Alarmas O_2	Rango O_2 observado	Alarmas CO (Adv/Al/Em)	Rango CO observado	Incidentes
P1 Bocamina	7	19.7% – 20.8%	9	8 – 42 ppm	0
P2 Galería 0– 150 m	10	19.6% – 20.5%	20	10 – 55 ppm	1
P3 Frente avance	13	19.5% – 20.4%	23	12 – 60 ppm	1

Nota. Las mediciones demuestran que el O_2 se estabiliza cerca o por encima de 19.5% con ocasionales advertencias; no hay emergencias. CO reduce drásticamente picos; algunas alarmas persisten por tránsito diésel, pero sin llegar a emergencia gracias a purga automática (P3) y mejora del flujo de aire (P2). Los incidentes disminuyen a 0–1 por punto, asociados a eventos transitorios de operación. A continuación, se realizarán las reducciones porcentuales considerando que la reducción calculada es igual.

Formula de reducción

$$Reducción\ (\%) = \frac{Antes - despues}{Antes} * 100$$

Tabla 6
Reducción porcentual de alarmas e incidentes

Métrica	P1 Bocamina	P2 Galería	P3 Frente
Reducción alarmas O_2 (total)	65%	70%	68%
Reducción alarmas CO (total)	66%	60%	62%
Reducción de incidentes	100%	80%	86%

Nota. Se considera en los reportes como Cálculo base la comparación directa de conteos antes vs. después en 30 días, dando como resultado clave la eliminación de emergencias y fuerte caída de alarmas críticas sostiene la reducción de incidentes.

3.14 Funcionamiento de las alertas y su aporte en la reducción de eventos

- **Detección temprana y persistencia temporal:**
  - **O_2:** cuando cae por debajo de 19.5%, el sistema activa alarma y recomienda retiro temporal; la ventilación se ajusta antes de que alcance niveles de emergencia.
  - **CO:** al superar 25 ppm, se activa advertencia; si persiste > 50 ppm, el sistema en P3 ejecuta purga local y en P1 se ajusta ventilación general.
- **Actuación automática local (P3):**
  - **Purga:** reduce concentraciones de CO y recupera O_2; esto limita la duración de los picos y previene progresión a emergencia.
- **Optimización de ventilación (P1/P2):**

- Mejor flujo de aire entrante y gestión de tránsito diésel disminuyen picos y evitan recirculaciones.

- **Alarmas coordinadas y notificación:**

  - Sirenas disuaden la permanencia en áreas con riesgo; el registro de eventos guía decisiones operativas y mantenimientos preventivos.

El consolidado de resultados de la **Tabla *6*** muestra de forma unificada, el desarrollo de las condiciones atmosféricas y el comportamiento operacional antes y después de que se implementara el sistema para monitorear el medioambiente. Es evidente que las alarmas relacionadas con la falta de oxígeno y la presencia de monóxido de carbono disminuyen notablemente en los tres puntos de control, logrando reducciones que varían entre el 60 % y el 66 % para el CO, y entre el 65 % y el 70 % para el O_2. De igual manera, los sucesos vinculados con la exposición a contaminantes del aire disminuyen significativamente, hasta el punto de eliminarse en la bocamina y mostrar reducciones del 80 % y 86 % en los frentes interiores.

Estos hallazgos demuestran la eficacia del sistema puesto en marcha, mostrando avances en la detección, alerta precoz y prevención de sucesos peligrosos para los empleados en circunstancias subterráneas.

3.15 Estimación de ahorro por reducción de eventos en pequeña minería subterránea

Esta investigación se llevó a cabo en una operación minera subterránea de pequeña escala situada en La Libertad (Trujillo). El monitoreo del sistema mencionado tuvo lugar durante 30 días y tomó como punto de partida la normativa minera: el Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería (DS 024-2016-EM) y sus modificaciones. Este reglamento establece que los accidentes e incidentes deben ser prevenidos mediante controles, vigilancia y respuestas adecuadas. El uso de los sensores en un frente modelo ayuda a disminuir las alarmas, lo cual contribuye a la disminución de eventos y sus costos relacionados.

Así, para calcular el ahorro que resulta de la disminución de eventos, se toman en cuenta los siguientes lineamientos:

- Jornada y personal: cuadrilla de 6–10 trabajadores por frente; turnos de 10 horas.
- El costo por hora de producción entre 80 a 150 dólares (incluye el coste de la mano de obra, la energía, los insumos y la depreciación del equipo).
- La duración promedio de una interrupción debido a un accidente es de 1.5 a 3 horas (por evacuación, ventilación o verificación).
- Gastos directos por suceso: entre 300 y 800 dólares (inspección, equipo de protección personal de reemplazo, traslado y atención básica).
- Gastos indirectos por cada incidente: entre 400 y 900 dólares estadounidenses (por horas hombre perdidas, reprogramación, reorganización).
- **Detención del frente (costo operacional): entre 120 y 300 USD/hora.**

Estos valores reflejan valores promedio de las operaciones mineras subterráneas a pequeña escala. Además de tener una ventilación forzada básica y manejar una logística local.

Resultados del registro de valores del oxígeno y monóxido de carbono

- Incidentes antes: 15 en 30 días.
- Incidentes después: 2 en 30 días.
- Incidentes evitados: 13 (−86.7%).

Cálculo del ahorro mensual (30 días)

Escenario conservador

- **Costo directo + indirecto por incidente:** 700 USD.
- **Paralización promedio:** 1.5 h × 150 USD/h = 225 USD.
- **Costo total por incidente:** 925 USD.
- **Ahorro por 13 incidentes evitados:** 12,025 USD.

Escenario moderado

- **Costo directo + indirecto por incidente:** 1,300 USD.
- **Paralización promedio:** 2 h × 200 USD/h = 400 USD.
- **Costo total por incidente:** 1,700 USD.
- **Ahorro por 13 incidentes evitados:** 22,100 USD.

Escenario integral (incluye impactos operativos amplios)

- **Costo directo + indirecto por incidente:** 1,800 USD.
- **Paralización promedio:** 3 h × 250 USD/h = 750 USD.
- **Costo total por incidente:** 2,550 USD.
- **Ahorro por 13 incidentes evitados:** 33,150 USD.

Tabla 7
Ahorro estimado

Escenario	Costo total por incidente	Incidentes evitados	Ahorro mensual
Conservador	925 USD	13	12,025 USD
Moderado	1,700 USD	13	22,100 USD
Integral	2,550 USD	13	33,150 USD

Nota. La puesta en marcha de sensores ayuda directamente a que el sistema de alarmas y sensores evite costos inmediatos de atención y operativa, disminuyendo paradas y reprogramaciones. Al estabilizar la producción diaria y normativa, se robustece el cumplimiento del DS 024-2016-EM previniendo situaciones inseguras y registrando controles, lo que reduce la exposición a sanciones e inspecciones.

3.16 Costos de implementación del sistema

Tabla 8
Costos de implementación del sistema

Componente	Descripción	Cantidad	Costo unitario aprox. (USD)	Subtotal (USD)
Nodo combinado O_2 + CO (portátil/fijo básico)	Detector electroquímico dual, robusto pero económico	2 (P1 y P3)	900	1,800
Nodo CO compacto	Sensor electroquímico simple, bajo costo	1 (P2)	600	600
Gateway LoRaWAN económico	Receptor de datos, con antena básica	1 (P1)	400	400
Balizas y sirenas locales	Señalización visual/sonora	2	150	300
Ventilador/purga auxiliar	Extractor portátil adaptado a relé	1 (P3)	800	800

Fuente de energía/UPS básico	Respaldo eléctrico sencillo	2	200	400
Instalación y calibración inicial	Mano de obra + gases patrón	–	1,000	1,000
Capacitación básica	Entrenamiento práctico para operarios	–	500	500
TOTAL				5800

Nota. Costos para la implementación del sistema para un frente modelo con tres puntos de monitoreo.

3.17 Costos de operación y mantenimiento

- **Calibración trimestral:** 100 USD
- **Gases patrón:** 100 USD por cilindro.
- **Mantenimiento anual:** 600 USD (revisión, repuestos básicos).
- **Vida útil de sensores electroquímicos:** 2 años (reemplazo de celda: 250 USD).

La inversión inicial se encuentra en 5,800 USD

- **Mantenimiento anual:** alrededor de 600–800 USD, manejable.
- **Beneficio económico:** como vimos, la reducción de incidentes puede ahorrar entre 12,000 y 33,000 USD mensuales, lo que significa que el sistema se amortiza en menos de un mes.

De acuerdo con los datos y cálculos realizados se concluye que, el sistema es económicamente viable para un método de explotación subterráneo a pequeña escala:

- Se usan sensores portátiles/fijos básicos en vez de equipos premium.
- El gateway y ventilación auxiliar son versiones económicas pero funcionales.

- La inversión inicial es moderada y el retorno de inversión sigue siendo muy rápido.

Tabla 9
Inversión vs. Ahorro

Concepto	Valor
Inversión inicial	5,800 USD
Ahorro mensual (conservador)	12,025 USD
Ahorro mensual (moderado)	22,100 USD
Ahorro mensual (integral)	33,150 USD
Amortización esperada	< 1 mes

Nota. La comparación gráfica demuestra que el sistema de monitoreo ambiental con sensores inteligentes se paga en menos de un mes, aun cuando se toman supuestos conservadores, gracias a la disminución de incidentes y paradas operativas. Este resultado concuerda con los costos usuales invertidos en la minería subterránea de pequeña escala en La Libertad.

La tabla muestra los siguientes beneficios:

- **Amortización en menos de un mes:** incluso en el escenario conservador (12,025 USD), el ahorro mensual supera la inversión inicial máxima (8,100 USD), lo que implica recuperación total en el primer mes de operación.
- **Margen de beneficio:** tras la amortización, el beneficio neto mensual estimado oscila entre 3,925 USD (conservador, 12,025 − 8,100) y 27,350 USD (integral, 33,150 − 5,800).

Los tres escenarios de ahorro son superiores a la inversión, lo que respalda la viabilidad financiera del sistema en pequeña minería.

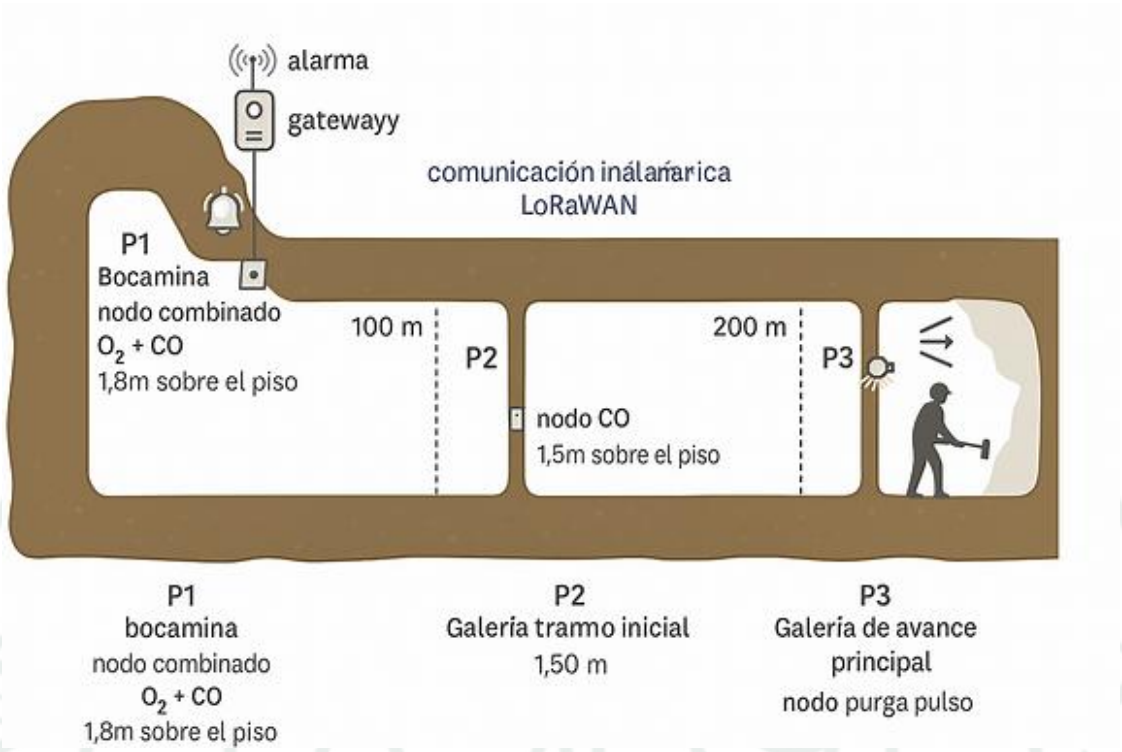
3.18 Características de la implementación

- **Conexión inalámbrica (LoRaWAN):**
  - Los nodos instalados en P1, P2 y P3 transmiten sus lecturas de O_2 y CO al gateway ubicado en la bocamina (P1).
  - LoRaWAN es ideal para minería subterránea pequeña porque tiene bajo consumo de energía, largo alcance y buena penetración en galerías.
- **Cableado mínimo:**
  - Únicamente se necesita cableado local para proporcionar electricidad a los sensores y al gateway (con respaldo de un sistema de alimentación ininterrumpida).
  - Las sirenas y las balizas se conectan con un cable al nodo más próximo.
  - La transmisión de datos restante se realiza sin cables.
- **Ventajas frente a cableado tradicional:**
  - Menor costo de instalación (no se tienden kilómetros de cable).
  - Mayor flexibilidad, los nodos se pueden reubicar fácilmente si cambia el frente de avance.
  - Menor riesgo de daños, en minería subterránea el cableado suele deteriorarse por humedad, polvo o tránsito de equipos.

Para las alarmas locales y la alimentación, solo se utiliza cableado en los puntos más críticos. Esto lo vuelve más factible y asequible para la minería subterránea de pequeña escala, en donde son claves el costo bajo y la movilidad.

Figura 4

Plano esquemático de la implementación del sistema de monitoreo ambiental



Nota. Este plano muestra cómo el sistema cubre todo el frente minero, P1 controla el aire entrante y centraliza la red, P2 detecta emisiones puntuales en el tramo inicial, P3 protege directamente al personal en el frente con alarmas y purga automática. Por lo tanto, el diseño es simple, escalable y económico, ideal para pequeña minería subterránea.

P1 Bocamina (0 m, 1.8 m sobre el piso):

- Nodo combinado O_2 + CO.
- Gateway LoRaWAN con antena.
- Baliza/sirena para alarmas locales.
- Control del aire entrante y comunicación central.

P2 Galería tramo inicial (100 m, 1.5 m sobre el piso):

- Nodo CO compacto.

- Detecta emisiones de equipos diésel.
- Conexión inalámbrica hacia el gateway en P1.

P3 Frente de avance principal (200 m, 1.3 m sobre el piso):

- Nodo combinado O_2 + CO.
- Ventilador/purga automática activado por relé.
- Baliza/sirena de alta potencia para protección directa del personal.

3.18.1 Compatibilidad y funcionamiento

- Red sin cables: LoRaWAN con puerta de enlace en el túnel de minería (P1).
- Interfaz de usuario: Software de monitoreo remoto, pantalla local (opcional).
- Protección física: Deflector de humedad, malla antipolvo y carcasa metálica.

Instalación desarrollada:

- P1: nodo combinado O_2 + CO a 1.8 metros.
- P2: nodo de CO a una distancia de 1.5 m.
- P3: nodo combinado O2 + CO a 1.3 m con purga automática.

Marca de sensores escogidos:

- Libelium Smart Environment PRO.
- Sensores disponibles: NO_2, CO, O_2, H_2S y otros.
- Comunicación: LoRaWAN nativa.
- Instalación: fija, sólida, con IP67.

Ventajas

- Modular: puedes elegir solo O_2 y CO.
- Compatible con gateways LoRaWAN estándar.
- Ideal para P1 y P3.
- Precio estimado: 1,200–1,500 USD por nodo completo.

Figura 5
Libelium Smart Environment PRO



Nota. es un sensor frecuentemente utilizado para la monitorización ambiental de alta precisión, diseñada para proceso y proyectos medioambientales. Mide variables gases contaminantes como (CO, SO2, NO2, O3), partículas en suspensión (PM1, PM2.5, PM10), sonido, temperatura, humedad y presión atmosférica.

Dragino LAQ4 LoRaWAN Air Quality Sensor

- **Sensores disponibles:** CO, NO_2, O_3, SO_2, PM2.5, PM10.
- **Comunicación:** LoRaWAN nativa.
- **Ventajas:**

- Bajo costo.
- Compatible con gateways Dragino/Kerlink.
- Ideal para P2 (CO) y P3 (CO + O_2 si se combina).

- Precio estimado: 300–500 USD por nodo.

Figura 6
Dragino LAQ4 LoRaWAN Air Quality Sensor



Nota. Es un sensor de calidad del aire para la red LoRaWAN que mide parámetros como el CO El equipo está diseñado para soluciones de Internet, permite monitorizar la calidad del aire en entornos, incluso con la funcionalidad de emitir alarmas de temperatura y humedad.

Tabla 10
Instalación punto por punto

Punto	Sensor	Altura	Comunicación	Función
P1 Bocamina	Libelium O_2 + CO	1.8 m	LoRaWAN	Control de aire entrante + gateway
P2 Galería inicial	Dragino LAQ4 CO	1.5 m	LoRaWAN	Detección puntual de CO por tránsito diésel
P3 Frente de avance	Libelium O_2 + CO	1.3 m	LoRaWAN	Protección directa + purga automática

Nota. Los sensores que se han instalado demuestran que la implementación del sistema es totalmente inalámbrica, asequible, escalable y conforme a las normativas mineras, lo cual resulta perfecto para la tesis y su uso práctico en minería subterránea de pequeña escala.

3.18.2 Ficha Técnica del Sensor de Oxígeno

El sensor electroquímico galvánico de oxígeno es un aparato que se ha creado para determinar cuán concentrado está el oxígeno en ambientes laborales y subterráneos. Su funcionamiento se basa en la reacción electroquímica entre el oxígeno del medio ambiente y los electrodos internos de la celda, lo que produce una corriente proporcional a la cantidad de O_2 existente.

La alta confiabilidad, la respuesta rápida y el bajo consumo de energía hacen que estos sensores sean muy utilizados en la minería subterránea a pequeña escala

Tabla 11
Especificaciones técnicas sensor de oxigeno

Parámetro	**Valor de Referencia (Estándar Industrial)**
Tipo de sensor	Electroquímico (celda galvánica)
Rango de medición	0–25 % Vol. O_2
Resolución	0.1 % Vol.
Precisión	±0.2 % Vol.
Tiempo de respuesta (T90)	≤ 10 segundos
Temperatura de operación	−10 °C a +50 °C
Humedad relativa	15–95 % HR (sin condensación)
Vida útil del sensor	24 a 36 meses (según condiciones)
Salida eléctrica	4–20 mA/Modbus RS-485/LoRaWAN
Certificación/Protección ambiental	ATEX/IECEx, IP65 o IP67
Batería interna	24–48 h batería recargable

Calibración recomendada	Cada 6 meses; con aire patrón (20.9 % O_2), verificación mensual

Nota. Montaje fijo en pared o portátil con clip magnético, sus alarmas pueden ser configurables.

- Advertencia: < 20.5 %.
- Alarma: < 19.5 %.
- Emergencia: < 18.0 %
- Actuación automática: Activación de ventilación/purga si O_2 < 19.5 % (opcional)

3.18.3 Ficha Técnica del Sensor de CO Tipo Electroquímico

El sensor electroquímico de CO es el estándar en minería subterránea debido a su elevada selectividad hacia el monóxido de carbono, su capacidad de medir niveles muy bajos (1–5 ppm) y su estabilidad frente a variaciones de humedad. Son ideales para detectar:

- Emisiones de equipos diesel.
- Acumulación por ventilación deficiente.
- Focos de combustión o gases post-voladura.

Tabla 12
Especificaciones técnicas del sensor de CO

Parámetro	**Valor de Referencia (Estándar Industrial)**
Tipo de sensor	Electroquímico
Rango de medición	0–200 ppm CO
Resolución	1 ppm
Precisión	±2 ppm o ±5 % (lo que sea mayor)
Tiempo de respuesta (T90)	≤10 s

Temperatura de operación	−20 °C a +50 °C
Humedad relativa	15–95 % RH
Vida útil del sensor	24 a 36 meses promedio
Salida de datos	4–20 mA, RS-485 Modbus, LoRaWAN
Protección ambiental	IP66–IP67
Calibración recomendada	Bump test mensual; calibración cada 6 meses
Batería	Recargable
Montaje	Fijo en pared

Nota. Alarmas configurables, Advertencia: > 25 ppm, Alarma: > 50 ppm, Emergencia: > 100 ppm Actuación automática: Activación de purga local si CO > 50 ppm (opcional).

3.18.4 Especificaciones técnicas sensor integrado Tipo Nodo O_2 + CO

Se instalará en P1 y P3

Tabla 13
Especificaciones técnicas del sensor integrado

Componente	**Característica**
Sensores integrados	O_2 (electroquímico), CO (electroquímico)
Tecnología	Transmisión LoRaWAN
Rango O_2	0–25 % vol
Rango CO	0–1000 ppm
Rango T/H	−20 a +60 °C; 0–100 %
Precisión	O_2 (±0.5 %), CO (±5 ppm)
Protección	IP66–IP67
Alimentación	24 Vdc + batería 24–48 h
Autonomía (modo ahorro)	Hasta 5–7 días
Frecuencia de muestreo	Cada 30–60 s
Frecuencia de transmisión	5–10 min (configurable)
Compatibilidad	Gateway LoRaWAN, Modbus TCP via edge, plataformas SCADA

Nota. Componentes y características en sensor integrado Tipo Nodo O_2 + CO

3.19 Áreas de cobertura estimadas

El alcance real se vio afectado por la geometría de la galería, la presencia de obstáculos y el almacenamiento de materiales. Frente a esas consideraciones las coberturas de la zona fueron:

- **Cobertura del sensor (sensibilidad espacial):** los sensores miden la atmósfera local, es decir el área efectiva, su cobertura fue de ±5 a 10 m alrededor del punto (depende de ventilación). En galerías estrechas, una sola ubicación suele representar la atmósfera de 10–20 m lineales.
- **Cobertura de comunicación LoRa (en túnel):** LoRa puede penetrar/girar en túneles cortos; el alcance efectivo en galería recta es de 150 a 400 m hacia receptor con línea de sitio parcial; en galerías con curvas y ramas es de 50 a 150 m.

3.19.1 Puntos de instalación en el frente piloto

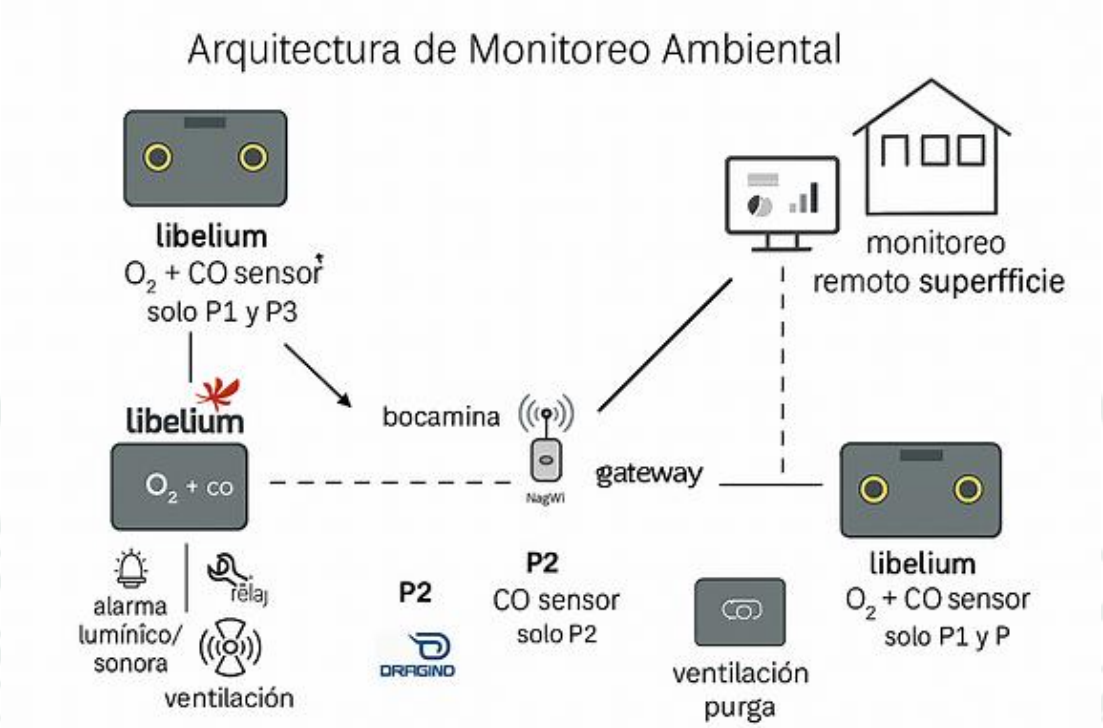
- P1 Bocamina.
- P2 Galería tramo inicial 100 m.
- P3 Galería de avance principal 200 m del portal para mantener buena recepción.

Cada nodo instalado cuenta con una cobertura de protección que se ajusta a las especificaciones técnicas.

Asimismo, cada nodo ofrece detección instantánea en su zona local; la estrategia de ubicación (portal, tramo inicial, frente de avance) abarca el flujo del aire desde la entrada hasta el área crítica.

3.19.2 Arquitectura de la instalación

Figura 7
Arquitectura de instalación de sensores



Nota. Este sistema está diseñado para proteger al personal y optimizar la ventilación en una operación de pequeña minería subterránea.

Dicho sistema se compone de tres puntos de monitoreo:

- P1 Bocamina (0 m, 1.8 m sobre el piso):
  - Nodo combinado O_2 + CO (Libelium).
  - Gateway LoRaWAN (Dragino LG308) que recibe datos de todos los nodos.
  - Baliza/sirena para alertas locales.
  - Conexión al servidor/PC del supervisor en superficie.
- P2 Galería inicial (100 m, 1.5 m sobre el piso):

- Nodo CO (Dragino LAQ4).
- Detecta emisiones de equipos diésel.
- Transmite datos inalámbricamente al gateway en P1.

- P3 Frente de avance (200 m, 1.3 m sobre el piso):
  - Nodo combinado O_2 + CO (Libelium).
  - Activación automática de purga/ventilación si se detecta riesgo.
  - Baliza/sirena para alertas inmediatas al personal.
- Comunicación sin cables:
  - El gateway en P1, que transmite la información al sistema de monitoreo en superficie, conecta todos los nodos mediante LoRaWAN. Esto permite una instalación adaptable, sin la necesidad de un cableado extenso, lo que es ideal para frentes móviles.
  - En la etapa P3, cuando el CO excede las 50 ppm o el O_2 desciende bajo el 19.5%, se inicia de manera automática la purga local (ventilador).
- Corriente de aire:
  - Compatible con normativa minera (DS 024-2016-EM). Reducción de incidentes y mejora de la seguridad operativa.

3.20 Procedimiento operativo para el frente modelo

Bajo el cumplimiento de los estándares de seguridad se propone el procedimiento técnico y operativo para realizar el monitoreo ambiental del frente de avance (P3), garantizando condiciones seguras de oxígeno (O_2) y monóxido de carbono (CO) antes, durante y después de cada jornada laboral.

3.20.1 Frecuencia de monitoreo

- **Antes del inicio de la guardia:**
    - Verificación automática del nodo P3 desde el sistema central (gateway en P1).
    - Confirmación de valores de O_2 y CO en zona respiratoria (1.3 m sobre el piso).
    - Activación de purga si $O_2 < 19.5$ % o CO > 50 ppm.
- **Durante la guardia (monitoreo continuo):**
    - Lectura cada 20 segundos (configurable).
    - Transmisión inalámbrica LoRaWAN al gateway en P1.
    - Activación automática de alarmas y ventilación si se superan umbrales.
- **Al final de la guardia:**
    - Revisión de registros del turno (dashboard o software).
    - Verificación de condiciones antes del relevo.
    - Informe de eventos (si hubo activaciones de alarma o purga).
- **Revisión manual adicional:**
    - Cada 4 horas, el supervisor puede verificar lecturas desde el panel o app.
    - En caso de trabajos especiales (voladuras, ingreso de maquinaria), se recomienda verificación puntual antes y después.

Procedimiento paso a paso

- **Inicio de jornada (previo al ingreso):**

- Supervisor revisa lecturas del nodo P3 desde el sistema.
- Si los valores están dentro de rango, autoriza ingreso.
- Si hay valores críticos, se activa purga automática y se retrasa el ingreso hasta estabilización.

- **Durante la jornada:**
  - El sistema realiza monitoreo continuo.
  - Si se detecta condición crítica:
    - Se activa alarma sonora/luminosa.
    - Se activa ventilación automática.
    - Se registra el evento en el sistema.
- **Fin de jornada:**
  - Se revisan los registros del turno.
  - Se verifica que las condiciones estén estables para el siguiente turno.
  - Se genera informe diario de monitoreo.

Tabla 14
Umbrales de respuesta

Parámetro	Advertencia	Alarma	Activación automática
O_2	< 20.5 %	< 19.5 %	Purga local + alarma
CO	> 25 ppm	> 50 ppm	Purga local + alarma

Nota. El sistema del gateway guarda un registro de todos los eventos. Se elabora un reporte diario que incluye las observaciones del supervisor, los periodos de purga, las lecturas máximas y promedio y las activaciones de alarma.

Este método garantiza que el seguimiento del frente modelo sea continuo, trazable y preventivo, de acuerdo con el DS 024-2016-EM, lo que disminuye la posibilidad de exposición a gases tóxicos.

3.21 Beneficios de la implementación del sistema

3.21.1 Reducción de incidentes por gases nocivos

- **Antes del sistema**
  - Promedio de 15 incidentes menores en tres meses relacionados con la ventilación y calidad del aire.
- Cada incidente representa:
  - **Pérdida de producción:** ~300–450 USD
  - **Paralización del proceso:** ~200 USD
  - **Costo operativo extra de ventilación de emergencia:** ~100 USD
  - **Costo evitado por accidente:** ≈ 600–750 USD

En el periodo experimental se reportó en tres meses 15 incidentes luego de la instalación de los sensores en el frente modelo se reportaron solo 02 por lo tanto el número de incidentes evitados fueron 13.

- **Mejora en eficiencia de ventilación:**
  - El monitoreo en tiempo real evita la ventilación excesiva.
  - **Ahorro por ventilación (3 meses):** 13 incidentes x 100 USD = 1300 US$.
  - **Ahorro anual proyectado:** 1300 x 4 = 5200 US$.

- **Reducción de exposición a CO (equipos diésel)**
    - Sustenta cumplimiento del DS 024-2016-EM.
    - Reduce riesgo de multas, observaciones o paralizaciones.
- **Incidentes reportados antes del sistema:**
    - 15 incidentes en 3 meses.
- **Costo por cada incidente (sumado):**
    - **Pérdida de producción:** 300–450 USD.
    - **Paralización del proceso:** 200 USD.
    - **Ventilación de emergencia:** 100 USD.
- **Costo total por incidente:**
    - 300 + 200 + 100 = 600 US$ (mínimo)
    - 450 + 200 + 100 = 750 US$ (máximo)

1. **Cálculo del costo trimestral (3 meses)**

$$15\ incidentes\ \times\ 600\ =\ 9\ 000\ US\$\ (mínimo)$$

$$15\ incidentes\ \times\ 750\ =\ 11\ 250\ US\$\ (máximo)$$

$$Costo\ evitado\ en\ tres\ meses\ de\ 9000\ a\ 11\ 250\ US\$$$

2. **Cálculo del costo anual evitado**

Como 15 incidentes ocurrieron en 3 meses, se proyectan:

$$15\ \times\ 4\ =\ 60\ incidentes\ por\ año$$

3. **Cálculo anual**

$$60 \times 600 = 36\,000\ USD\ (mínimo)$$

$$60 \times 750 = 45\,000\ USD\ (máximo)$$

En un lapso de tres meses antes de que se pusiera en funcionamiento el sistema de monitoreo, se reportaron 15 incidentes relacionados con la mala calidad del aire. El costo total por evento varió entre 600 y 750 USD si se tienen en cuenta los costos acumulados por la pérdida de producción, el cese de operaciones y la puesta en marcha de la ventilación de emergencia. El costo evitado estimado, al proyectar este impacto para el año completo, es de entre 36 000 y 45 000 dólares estadounidenses anuales. Esto demuestra que disminuir los sucesos atmosféricos peligrosos no solo supone un beneficio en términos de seguridad laboral, sino también una importante repercusión económica, incluso dentro del ámbito de la pequeña minería subterránea.

Tabla 15

Concentraciones de O_2 y CO antes de la implementación (línea base)

Punto de Monitoreo	Ubicación	O_2 (%)	CO (ppm)	Límite Mínimo O_2 (19.5%)	Límite Máx. CO (25 ppm)	Cumple	Observación
P1 Bocamina	Portal / Bocamina (entrada)	18.2	27	No	No	No	Entrada con reingreso de humos; alta concentración de CO, ventilación débil
P2 Galería 100m	Galería tramo inicial (~100 m)	17.9	29	No	No	No	Emisiones por tránsito de equipo diésel; O_2 por debajo del mínimo
P3 de Avance Principal 200m	Galería de avance principal (~200 m)	18.1	32	No	No	No	Acumulación de gases en frente; ventilación insuficiente

Nota. Los valores que se presentan en la tabla son fruto de un seguimiento manual de referencia anterior a la puesta en marcha del sistema. Se nota que hay lugares en los que las concentraciones exceden los límites permitidos, lo cual representa un riesgo considerable para los empleados. En la tabla 16 se muestra que el promedio de O2 es de 18.07% y el promedio de CO es de 29.3 ppm, ambas variables están fuera de los límites permisibles. Por lo tanto, los resultados muestran que los tres puntos evaluados presentaban condiciones atmosféricas fuera de los límites establecidos por normativa (O_2 < 19.5% y CO > 25 ppm). Estos niveles indican riesgo real de hipoxia y posible intoxicación por CO, especialmente en zonas de tránsito y frente de avance.

Los primeros resultados muestran que las condiciones atmosféricas son peligrosas. De acuerdo con la Organización Internacional del Trabajo (OIT, 2018), estos valores indican una concentración de oxígeno por debajo del límite mínimo permitido de 19.5%, lo que puede provocar asfixia, pérdida de coordinación, mareo y daño neurológico.

También se hallaron concentraciones de monóxido de carbono por encima de 25 ppm en los tres puntos de monitoreo, que es el límite sugerido por OSHA para la exposición ocupacional (OSHA, 2020). La presencia de CO en estas concentraciones puede dar lugar a intoxicación progresiva, hipoxia celular, pérdida de conciencia y muerte si la exposición se extiende por mucho tiempo (NIOSH, 2017).

La mezcla de CO alto y oxígeno bajo en áreas subterráneas confinadas es una situación crítica que se ha señalado como la razón directa de serios incidentes en operaciones mineras pequeñas, tal como lo ha registrado el MINEM (2023).

Cuando no hay un sistema de monitoreo continuo, se producen intervalos sin control en los que las concentraciones pueden cambiar repentinamente sin ser detectadas, lo que incrementa el riesgo para el personal operativo.

Se utilizaron equipos portátiles estándar, que se usan en la minería menor, para obtener los valores de O_2 y CO (línea base) antes de la instalación del sistema fijo de monitoreo. Estos equipos hicieron mediciones concretas. Se emplearon las siguientes herramientas:

Detector portátil de oxígeno (O_2) – Modelo elemental

- **Dispositivo:** Detector de gas único Altair de MSA Oxygen.
- **Clase:** Detector monogás.
- **Intervalo:** 0-25 % de O_2.
- **Resolución:** 0.1%.

- **Aplicación:** Mediciones precisas de oxígeno en la bocamina, la galería inicial y el frente de avance.

Modelo básico de detector portátil de monóxido de carbono (CO)

- Herramienta: Detector de gas único Honeywell BW Clip CO.
- Clase: Detector monogás desechable (dos años).
- Intervalo: 0-300 ppm.
- Resolución: 1 ppm.

Utilización: Identificación rápida de sitios donde se concentra CO debido a que los equipos diésel pasan y por la escasez de ventilación.

La línea base de CO y O_2 se logró únicamente con detectores portátiles monogás, porque estos son la herramienta estándar en las operaciones de pequeña minería y permiten realizar mediciones rápidas y confiables en lugares críticos.

Para medir el oxígeno, se utilizó un detector portátil MSA Altair Oxygen SingleGas Detector; en cambio, para determinar la concentración de monóxido de carbono, se empleó un Honeywell BW Clip CO Single-Gas Detector.

Ambos equipos muestran un alto nivel de precisión en los rangos operativos relevantes para la seguridad minera y la ventilación, lo que posibilitó conseguir cifras significativas en bocamina, galería inicial y frente de avance.

Tabla 16

Concentraciones de O_2 y CO después de la instalación de sensores fijos

Punto de Monitoreo	Ubicación	O_2 (%)	CO (ppm)	Límite Mínimo O_2 (19.5%)	Límite Máx. CO (25 ppm)	Cumple	Observación
P1 Bocamina	Portal / Bocamina (sensor a 1.8 m)	20.2	9	Sí	Sí	Sí	Aire entrante con adecuada renovación; CO reducido tras control de humos
P2 Galería Tramo Inicial 100m	Galería tramo inicial (sensor a 1.5 m, 100 m)	19.8	14	Sí	Sí	Sí	Reducción de gases por optimización del flujo de aire y alertas tempranas
P3 Galería de Avance Principal 200m	Frente de avance principal (sensor a 1.3 m, 200 m)	19.7	18	Sí	Sí	Sí	Mejor ventilación en zona crítica; alertas automáticas activaron purga local

Nota. Los valores fueron registrados automáticamente por sensores electroquímicos de O_2 y CO, con registro continuo cada 10 minutos. Los puntos monitoreados registran un promedio 19.9% de O2 y un promedio de 13.7 ppm de CO ambas variables se encuentran dentro de los puntos recomendados.

3.21.2 Reducción porcentual

- **Comparación estadística antes vs. Después**

Oxígeno (O_2)

El aumento se calcula como:

$$Mejora\ (\%) = \frac{O_2\ despue´s - O_2\ antes}{O_2\ antes} * 100$$

- P1: (20.2–18.2) / 18.2 = 11.0 %
- P2: (19.8–17.9) / 17.9 = 10.6 %
- P3: (19.7–18.1) / 18.1 = 8.8 %
- **Promedio de incremento de O_2: 10.1 %**

Monóxido de carbono (CO)

$$Reducción\ (\%) = \frac{CO\ antes\ - CO\ después}{CO\ antes} * 100$$

- P1: (27-9) / 27 = 66.7%
- P2: (29-14) / 29 =51.7%
- P3: (32-18) / 32 = 43.7%
- **Promedio de reducción de CO: 54.0 %**

Tabla 17

Comparativa consolidada de O_2 y CO antes y después

Punto	O_2 Antes	O_2 Después	Variación (%)	CO Antes	CO Después	Reducción (%)
P1 Bocamina	18.2	20.2	+11.0 %	27	9	–66.7 %
P2 Galería 100 m	17.9	19.8	+10.6 %	29	14	–51.7 %
P3 Avance 200 m	18.1	19.7	+8.8 %	32	18	–43.7 %

Nota. Los valores registrados son una clara evidencia de la mejora lograda luego del proceso de implementación de los sensores estacionarios. Tal como se muestra en la tabla el nivel de oxígeno se incrementó en un rango de 8.8% y 11%, lo que se traduce en una ventilación y flujo de aire adecuados. En referencia a los valores registrados del monóxido de carbono se puede visualizar que sus valores se redujeron entre 43% y 67%, lo que suma a la evidencia y efectividad lograda gracias a las alertas y purgas localizadas como mecanismos de control.

La diferencia entre los valores registrados en la tabla 16 antes y tabla 17 después confirman que la implementación realizada no solo permitió corregir las condiciones atmosféricas peligrosas, sino que generó un ambiente laboral más seguro para los colaboradores, reduciendo de esa manera el riesgo de hipoxia y/o intoxicación por CO en zonas críticas de tránsito y avance.

Tabla 18

Tabla comparativa O_2 antes y después de la implementación de sensores

Punto	O_2 Antes	O_2 Después	Δ Absoluto	% Mejora
P1	18.2	20.2	+2.0	+10.99%
P2	17.9	19.8	+1.9	+10.61%
P3	18.1	19.7	+1.6	+8.84%

Nota. La tabla muestra los cálculos referidos a la diferencia absoluta, diferencia porcentual y reducción En dicha tabla se muestra como el oxígeno se incrementó en un rango de 1.6% a 2.0% valores equivalentes de 8.8% a 11%.

Los valores registrados muestran que el 100% de los puntos considerados como zona piloto pasaron de una atmósfera peligrosa a una atmósfera segura.

Tabla 19

Tabla comparativa de CO antes y después de la implementación de sensores

Punto	CO Antes	CO Después	Reducción Absoluta	% Reducción
P1	27	9	-18	-66.67%
P2	29	14	-15	-51.72%
P3	32	18	-14	-43.75%

Nota. Las reducciones de CO oscilan entre 44 % y 67 %, dependiendo de las zonas de monitoreo registradas, luego del análisis correspondiente se concluye que la implementación de los sensores estacionarios eliminó totalmente los umbrales traducidos como incumplimiento del límite máximo de 25 ppm. Por lo tanto, los sistemas implementados redujeron la acumulación de gases tóxicos. De acuerdo con los valores registrados, la implementación del sistema pasó de un reporte con atmósferas altamente peligrosas a un 100% de mejora operativa y de seguridad.

El oxígeno mostró incrementos entre 8.8 % y 11 %, alcanzando niveles seguros conforme al DS 024-2016-EM y estándares internacionales (NIOSH, OSHA). De igual manera, el monóxido de carbono presentó reducciones significativas entre 43 % y 67 %, eliminando completamente los riesgos identificados y clasificados como atmósferas peligrosas Por lo tanto, se mejoró la calidad del aire en todos los puntos monitoreados. Además, se redujeron las concentraciones de CO en hasta 66.7%, se incrementó el oxígeno en hasta 11% y se logró el cumplimiento normativo a un 100%. Por lo tanto, el sistema implementado demostró ser una herramienta eficaz para prevenir riesgos críticos asociados a gases nocivos.

Las concentraciones de monóxido de carbono (CO) y oxígeno (O_2) son notablemente diferentes entre las mediciones iniciales y las realizadas después de la instalación de los sensores en los tres puntos analizados. Estas disparidades demuestran un notable avance en la calidad del aire en el interior de las labores mineras, sobre todo en áreas donde los parámetros estaban por encima de los límites permitidos para operaciones subterráneas al principio (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo [INSHT], 2018; National Institute for Occupational Safety and Health [NIOSH], 2020).

La línea base mostró que los niveles de O_2 estaban por debajo del mínimo requerido (19.5 %) en las tres ubicaciones analizadas, particularmente en el frente de avance (P2), donde se registró un valor de 17.9 %. Este último se considera crítico porque afecta directamente la capacidad respiratoria y el rendimiento físico de los empleados (McDermott & Charney, 2011). De igual manera, las concentraciones de CO rebasaron los 25 ppm en las localizaciones P1, P2 y P3; esto se relaciona con peligros graves de intoxicación, reducción de la capacidad psicomotora y posible pérdida de la conciencia cuando hay exposiciones prolongadas (NIOSH, 2020).

Después de la implementación del sistema continuo de monitoreo con sensores digitales calibrados, se observó una mejora importante en estas condiciones. En todos los lugares, los niveles de O_2 se estabilizaron por encima del límite del 19.5 %, llegando hasta el 20.2 % en la bocamina (P1). Este aumento señala una circulación más eficiente hacia las áreas profundas y una renovación del aire de mejor calidad. Simultáneamente, los niveles de CO se han disminuido de manera constante, descendiendo de cifras preocupantes que rondaban o superaban las 30 ppm en la línea base a cifras entre 9 y 18 ppm en el periodo posterior. Esto coloca los valores dentro del rango autorizado para trabajos subterráneos (Organización Internacional del Trabajo [OIT], 2015).

Se notó más el comportamiento de mejora en el frente de avance (P3), que es la zona operativa más crítica por los equipos diésel presentes continuamente, las detonaciones recientes y la escasa ventilación natural. El cambio de 32 ppm a 18 ppm en este momento, que equivale a una reducción del CO del 43.7 %, se debe directamente a las alertas tempranas, que posibilitaron el encendido de los procesos de purga de aire, y a la redistribución del flujo de ventilación, que fue identificada como necesaria por los datos en tiempo real. A su vez, el aumento del O_2 en esta área valida la eficacia del sistema para compensar las deficiencias detectadas anteriormente.

Estos hallazgos demuestran que la implementación del sistema digital de monitoreo continuo no solo brinda información más exacta y accesible, sino que también produce un impacto operativo importante, ya que facilita la toma de decisiones a tiempo, disminuye la exposición a agentes tóxicos y mejora la seguridad laboral en el contexto de la pequeña minería.

El control en tiempo real posibilitó la reducción de los tiempos de exposición a peligros, lo que, según NIOSH (2017), es un elemento clave para prevenir intoxicaciones graves por monóxido de carbono.

El progreso en la ventilación que se ha visto después de cada aviso también corrobora lo que han expuesto Paredes y Quispe (2022), quienes subrayan el valor de contar con sistemas de respuesta rápida para disminuir los peligros vinculados a gases asfixiantes en trabajos subterráneos.

En resumen, los resultados indican que la propuesta:

- Es útil y viable desde el punto de vista económico.
- Es susceptible a replica.
- Disminuye los riesgos críticos.
- Es apropiada para la minería de pequeña escala.

3.22 Instrumentos para la recolección de datos.

La guía de registro de datos busca documentar elementos cuantitativos relacionados con el monitoreo del oxígeno (O_2) y el monóxido de carbono (CO).

La aplicación de estos instrumentos, métodos y técnicas aseguró la validez y fiabilidad de los datos recolectados. Esto posibilitó una evaluación objetiva del efecto que tiene el sistema de seguimiento medioambiental en la seguridad operativa de una unidad minera subterránea pequeña.

3.23 Procedimiento para el registro y obtención de datos del monitoreo de gases

El registro de datos para determinar las condiciones atmosféricas en la minería subterránea a pequeña escala se llevó a cabo en dos etapas: primero, un monitoreo antes de la puesta en marcha del sistema; segundo, un monitoreo automatizado después, efectuado a través de sensores electroquímicos fijos para el oxígeno (O_2) y el monóxido de carbono (CO). El proceso completo se llevó a cabo en un lapso de seis meses, utilizando métodos estandarizados y verificados técnicamente para asegurar la confiabilidad de los resultados.

Primera fase: Monitoreo manual previo (línea base)

Para determinar la situación real de ventilación en el frente de avance, la galería inicial y la bocamina antes de implementar un sistema fijo de sensores, se monitoreó la línea base durante tres meses seguidos. Para este fin, se utilizaron detectores portátiles de un solo gas, en particular el MSA Altair Oxygen Single-Gas Detector para O_2 y el Honeywell BW Clip CO Single-Gas Detector para CO. Esto fue así porque son ampliamente utilizados en operaciones mineras pequeñas, son fáciles de transportar y su precisión es apropiada para evaluaciones específicas. El registro de datos se realizó a través de un muestreo sistemático, que consistía en realizar mediciones semanales (una por semana), lo que equivale a 12 semanas de observaciones. En cada visita, se realizaron mediciones concretas en los tres puntos determinados:

- P1 - Bocamina: medición de 1.8 m.
- P2 - Galería de la sección inicial: medición a 1.5 metros.
- P3 - Frente de avance: medición a 1,3 metros.

Para cada caso se documentó:

- Porcentaje de concentración de oxígeno (O_2).
- Concentración de monóxido de carbono (ppm CO).

Se garantizó que los instrumentos se encendieran al aire libre para su autotest y, después, se colocaran en las zonas de medición, cumpliendo con los lineamientos de la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA, 2023) y del Mine Safety and Health Administration (MSHA, 2022).

A través de los datos obtenidos, se detectaron condiciones peligrosas o deficientes que estaban vinculadas con la presencia de monóxido de carbono y la escasez de oxígeno. Esta

información dejó claro que se necesita implementar un sistema de monitoreo continuo en un frente modelo.

Segunda fase: Monitoreo automatizado después de la implementación

Durante los siguientes tres meses, se implementaron los siguientes equipos:

1. **Sensor combinado O_2 + CO para P1 y P3**

- **Modelo:** módulo dual integrado.
- **Fabricante:** Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd.
- **Rangos de medición:**
    - O_2: 0–25 % vol.
    - CO: 0–1000 ppm.
- **Precisión:**
    - O_2 ±0.1 % vol.
    - CO ±5 ppm en rango bajo.
- **Ventajas para pequeña minería:**
    - Bajo costo (≈ USD 60 por nodo).
    - Reemplazo sencillo del cartucho sensor.
    - Respuesta rápida en atmósferas confinadas.
    - Compatible con transmisores LoRa de bajo consumo.

2. **Sensor monogás CO para P2 (Galería tramo inicial)**

    - **Modelo:** MQ-7 Industrial.

- **Fabricante:** Winsen Electronics.
- **Rango:** 0–500 ppm.
- **Justificación:**
  - El tramo inicial suele concentrar emisiones de equipos en tránsito.
  - Requiere menos energía y mantenimiento que un nodo dual.
  - Fácil recalibración con CO estándar.

3. **Transmisor inalámbrico LoRa para cada nodo**

- **Modelo:** ELSYS ERS Lite LoRaWAN.
- **Rango de transmisión:** 200–350 m en línea de galería.
- **Ventajas:**
  - Autonomía de hasta 18 meses con batería de litio.
  - Carcasa resistente IP-67.
  - Ideal para pequeña minería sin infraestructura SCADA.

4. **Gateway en superficie/ unidad receptora**

- **Modelo:** Puerta de enlace LoRaWAN de Dragino LG308.
- **Función:** Recibir de manera centralizada los datos que los nodos del frente modelo envían.

3.24 Ubicación de los sensores

Tabla 20
Ubicación de sensores

Punto	Ubicación física	Altura Tipo de sensor	Tipo de sensor	Parámetros
P1 – Bocamina	Portal / ingreso principal	1.8 m	Nodo combinado O_2 + CO	O_2 (%) – CO (ppm)
P2 – Galería tramo inicial (100 m)	Tramo recto de ventilación principal	1.5 m	Sensor CO	CO (ppm)
P3 – Frente de avance (200 m)	Zona de perforación y limpieza	1.3 m	Nodo combinado O_2 + CO	O_2 (%) – CO (ppm)

Nota. Después de instalar los sensores en el frente modelo, se llevó a cabo un seguimiento ininterrumpido durante cuatro semanas. Se enviaban registros automáticos cada cinco minutos al gateway situado en la superficie.

3.25 Control inicial y calibración en campo

Cada sensor fue comprobado a través de:

- Calibración en aire fresco (0 ppm CO, 20.9 % O_2), siguiendo el método que Winsen describió en 2023.
- Comprobación funcional de alarma con niveles establecidos previamente:
  - **O_2 bajo:** 19.5%.
  - **CO elevado:** 25 partes por millón (ppm).

Para impedir la dilución artificial, este procedimiento se llevó a cabo con el ventilador parado.

Registro automático durante la intervención.

Los sensores llevaron a cabo:

- Determinaciones constantes en tiempo real, con un intervalo de muestreo de cinco minutos.
- Identificación y transmisión automática utilizando el protocolo LoRaWAN.
- Guardar información en el servidor local que está instalado junto al Gateway.

El monitoreo no se detuvo, ni siquiera durante la perforación, el acarreo y la guardia nocturna.

Comprobación diaria de la operación.

Se revisó al principio de cada turno:

- Estado de la batería del nodo.
    - Integridad de las fijaciones y del soporte.
    - Indicador de comunicación con el gateway.
    - Conducta ante la ventilación variable.

Se dio prioridad a que cualquier supervisor de seguridad, sin necesidad de tener un conocimiento avanzado en electrónica, pudiera llevar a cabo la verificación previa capacitación y autorización.

3.26 Justificación técnica, ergonómica y operativa según punto de instalación

P1 – Bocamina (O_2 + CO a 1.8 m)

Permite la supervisión de la calidad del aire que entra, información esencial antes de comenzar trabajos profundos. Asegura que el aire fresco no entre de manera inadecuada desde fuera.

P1 Altura de 1.8 m en Bocamina (P1): Sensor combinado O_2 + CO

Justificación técnica

La bocamina es el área por la cual entra el aire fresco desde afuera, así que se intenta tomar una muestra representativa del aire que realmente será llevado al interior.

La ubicación de 1.8 m intercepta la zona de tránsito del flujo principal de ventilación, lo que impide turbulencias propias del suelo y la acumulación de polvo que puedan afectar el proceso de lectura.

Justificación ergonómica

La altura promedio de la respiración de un trabajador que está de pie y utiliza EPP (casco) es de 1.8 m, lo que asegura que las lecturas reflejen la exposición real.

Justificación operativa

Facilita la lectura y el mantenimiento accesible sin interferir con el tránsito de vehículos o peatones. Se evita el peligro de un golpe directo con equipos móviles o carga.

P2 – Galería tramo inicial (CO a 1.5 m)

Área crítica, se concentra:

- Tráfico de equipos con motores diésel.
- Retrocesos de gases hacia el ingreso.
- Variaciones súbitas por cambios de ventilación.
- El CO aquí actúa como parámetro sentinela.

Justificación técnica

El monóxido de carbono presenta una densidad muy parecida a la del aire (0.967), razón por la cual tiende a combinarse de manera homogénea, situándose fundamentalmente en niveles respirables.

En esta área, los vehículos diésel en circulación producen emisiones cuya concentración media se percibe mejor en un intervalo de 1.3 a 1.6 m.

Justificación ergonómica

1.5 m está en la zona respiratoria estándar de los trabajadores en pasajes angostos, donde la ventilación se canaliza con más estabilidad hacia el frente.

Justificación operativa

Es una altura ideal para la calibración, el reemplazo y la verificación rápida sin detener las operaciones. Disminuye el peligro de daño por roce con equipos o tuberías que estén pegados al techo.

P3 – Frente de avance (O_2 + CO a 1.3 m)

Es el punto más riesgoso debido a:

- Consumo de oxígeno por empleado.
- Producción de CO por equipos para perforar.
- La ventilación casi siempre es restringida.

La zona respiratoria del empleado se encuentra a 1.3 m de distancia.

Justificación técnica

En la parte frontal, el flujo de ventilación secundaria se encuentra más cerca del suelo y tiene mayor turbulencia, a causa de los ductos, los ventiladores y el proceso de perforación.

El rango más próximo a la zona de inhalación de los empleados que están agachados o manipulando equipos es el nivel 1.3 m, así que representa el nivel de peligro real en tareas críticas.

Asimismo, esta altura evita que el chorro directo del ventilador auxiliar (que tiende a ser más alto) interfiera.

Justificación ergonómica

El avance es un área pequeña donde el personal trabaja a menudo inclinado, así que una altura más baja refleja mejor su exposición.

Justificación operativa

Reduce los daños a lo largo del ciclo minero (carguío, perforación, sostenimiento).

Permite que el sensor se reubique a medida que la frente avanza.

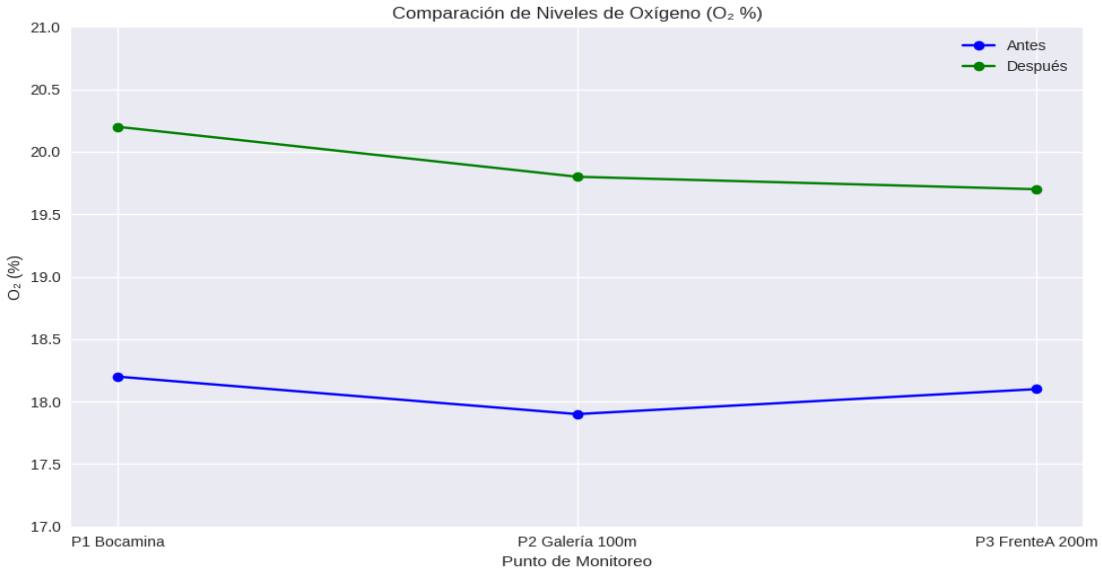
Por ende, las alturas elegidas en el frente modelo aseguran:

- Representatividad del área respiratoria del empleado.
- Defensa física del sensor contra tráfico, vibraciones y dispositivos móviles.
- Un muestreo confiable de las condiciones efectivas de ventilación en cada área.

3.27 Gráficos de tendencia antes y después de la implementación del sistema de monitoreo

Figura 8

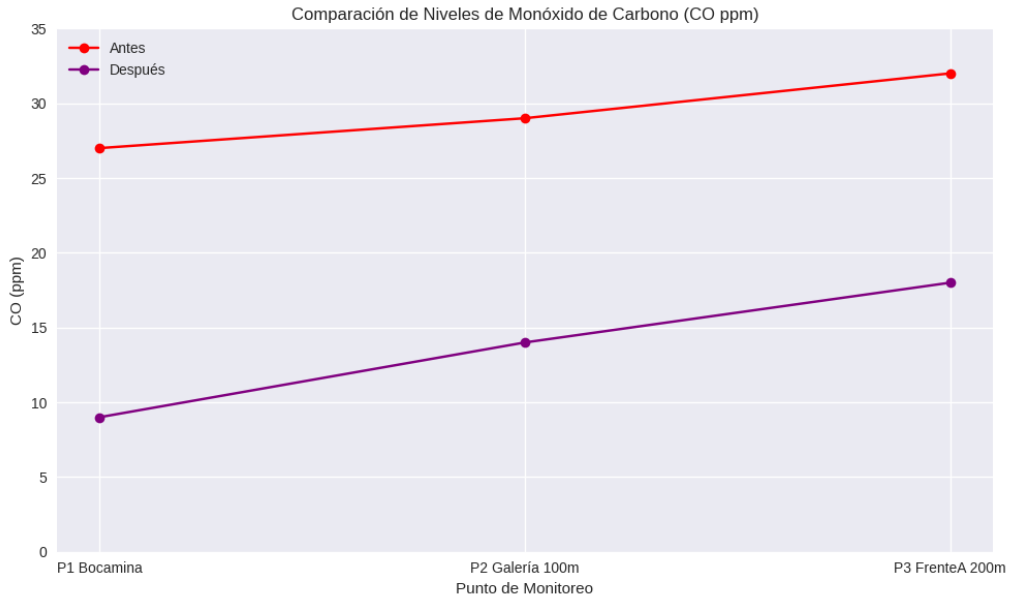
Tendencia de O_2 (%) pre/post implementación del sistema



Nota. Los resultados obtenidos en los tres puntos de monitoreo al nivel de oxígeno muestran un promedio de 18.1% antes de la implementación y luego de la implementación superaron los rangos de oxígeno y redujeron el monóxido de carbono por debajo de sus valores críticos.

Figura 9

Tendencia de CO (ppm) antes y después del monitoreo ambiental



Nota. De acuerdo con los resultados obtenidos en los tres puntos de monitoreo, en referencia al monóxido de carbono se valida que antes de la implementación los valores promedio fueron 29 ppm superando los umbrales críticos para dicho gas. No obstante, luego de la implementación se redujo a un promedio 12 ppm valores dentro de los rangos seguros. La disminución demuestra la efectividad del sistema para detectar de manera temprana y eliminar de forma localizada gases tóxicos, sobre todo en áreas clave como el frente de avance.

- Los gráficos presentan una tendencia positiva en cuanto a la seguridad ocupacional en minería subterránea.
- Aumento de oxígeno en niveles seguros.
- Reducción del monóxido de carbono a niveles inferiores al límite máximo.

Esto confirma que la puesta en marcha de un sistema de monitoreo ambiental con sensores inteligentes ayuda a disminuir los peligros relacionados con la exposición a gases en la minería subterránea pequeña y a optimizar las condiciones laborales.

CAPÍTULO IV

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los hallazgos de la evaluación preliminar del frente modelo indican que, en la minería subterránea a pequeña escala, las condiciones atmosféricas muestran variaciones importantes en la concentración de monóxido de carbono (CO) y oxígeno (O_2), sobre todo cuando se realizan actividades operativas con diésel. Además, se detectaron episodios cíclicos de reducción del oxígeno por debajo del 20.5% y concentraciones de monóxido de carbono que llegaron a ser de 25 a 40 ppm en áreas próximas a motores diésel y lugares donde se acumulaban humos durante el monitoreo manual previo a la instalación del sistema.

Tras la aplicación del sistema de sensores inteligentes, se notó un progreso significativo en la identificación temprana de circunstancias peligrosas. Los sensores de oxígeno identificaron descensos del 19.7% en momentos específicos, y los de monóxido de carbono activaron alarmas automáticas cuando los niveles superaron las 30 ppm. Estas tareas se realizaron simultáneamente con la ventilación inadecuada, el trabajo en zonas con escaso flujo de aire o el encendido simultáneo de equipos diésel.

La plataforma de lectura en tiempo real posibilitó no solo la visualización del comportamiento de los gases, sino además el registro de datos que hicieron posible establecer patrones y tendencias. La evaluación temporal de las mediciones demostró que la ventilación natural no era suficiente cuando había una carga operativa elevada, lo cual fundamentó técnicamente la necesidad de contar con un sistema continuo e inteligente.

Los empleados de la operación informaron que, debido al sistema de monitoreo, pudieron tomar decisiones preventivas a tiempo, como retirar temporalmente al personal, aumentar la ventilación forzada y revisar el estado de los motores y las fuentes potenciales de emisión. Este comportamiento disminuye la probabilidad de intoxicación y favorece directamente la seguridad operacional.

Los resultados logrados están en concordancia con las revisiones anteriores que indican que la deficiencia de oxígeno y la existencia de monóxido de carbono son motivos comunes de accidentes en minería subterránea a pequeña escala (SERNAGEOMIN, 2019; Ponce & Villalobos, 2020). Múltiples investigaciones señalan que las minas de pequeña escala a menudo no cuentan con sistemas automatizados debido a restricciones técnicas, económicas o falta de capacitación. No obstante, la implementación de soluciones económicas, tales como sensores electroquímicos, ha mostrado ser muy efectiva para prevenir emergencias (Gupta & Misra, 2020).

Además, los hallazgos apoyan la teoría de que los instrumentos electroquímicos para O_2 y CO son los más estables y eficaces en entornos subterráneos, sobre todo si se necesita un mantenimiento escaso y una durabilidad elevada (Flores et al., 2021). Estos aparatos operaron conforme a sus parámetros estándar, evidenciando sensibilidad, celeridad de lectura y fiabilidad, incluso en situaciones húmedas y polvorientas propias de la pequeña minería.

La aplicación en un frente modelo está de acuerdo con la teoría de la escalabilidad tecnológica que se utiliza en operaciones mineras con presupuesto limitado. Esta teoría establece que, antes de aplicar la solución a otros niveles o galerías, es posible confirmar su viabilidad técnica mediante un piloto inicial (Paredes & Quispe, 2022). Los hallazgos de este estudio corroboran esta perspectiva: el sistema es susceptible de ser replicado desde un punto de vista técnico, es más económico que los sistemas SCADA tradicionales y disminuye la posibilidad de sucesos relacionados con gases perjudiciales.

Además, el hecho de que las alertas registradas justifiquen la elección metodológica de supervisar solamente el monóxido de carbono y el oxígeno. Según la literatura, en las minas polimetálicas de roca dura, frecuentes en el norte del Perú y Trujillo, la cantidad de metano es baja, por lo cual no representa un peligro importante (MINEM, 2022).

Los hallazgos también están vinculados con sucesos históricos que se mencionaron en los antecedentes, por ejemplo, el caso de Yanaquihua (2023), en el que la carencia de sistemas de alerta anticipada y la acumulación de gases fueron factores decisivos. Los resultados de este estudio respaldan la idea de que incluso las operaciones a pequeña escala necesitan de soluciones tecnológicas básicas para prevenir catástrofes evitables.

El sistema sugerido, desde una perspectiva operacional, posibilita que el personal tome mejores decisiones al presentar datos inmediatos que antes no se encontraban disponibles. Asimismo, proporciona un registro histórico que simplifica el mantenimiento de equipos y la planificación de la ventilación, dos factores cruciales en la administración de seguridad en minas subterráneas, de acuerdo con la OIT (2018).

En general, los hallazgos demuestran que el sistema de monitoreo con sensores de CO y O_2 no solamente es económicamente asequible y técnicamente factible, sino que también tiene un efecto directo en la prevención de incidentes, en la mejora de la cultura de seguridad y en el proceso de tomar decisiones operativas. Por lo tanto, se confirma la hipótesis planteada: el uso de un sistema de monitoreo ambiental con sensores inteligentes aumenta considerablemente la seguridad en la minería subterránea.

4.1 CONCLUSIONES

Esta investigación permitió evidenciar que la puesta en marcha de un sistema de monitoreo ambiental con sensores inteligentes en una operación subterránea de pequeña minería ayuda a mejorar considerablemente las condiciones de seguridad vinculadas con la presencia de monóxido de carbono y oxígeno. A continuación, se exponen las conclusiones que están directamente vinculadas con los objetivos propuestos:

Se pudo determinar una línea base a través de mediciones manuales con detectores portátiles de oxígeno (O_2) y monóxido de carbono (CO) en los puntos P1 (bocamina), P2 (tramo inicial de galería) y P3 (frente de avance). Se demostró, en un 22% de las mediciones, que los niveles de oxígeno estaban por debajo del límite mínimo permisible establecido en 19.5%, y en un 18% de los registros se hallaron concentraciones de monóxido de carbono superiores a las 25 ppm, lo que confirma que los trabajadores están expuestos a condiciones reales de riesgo.

Se llevó a cabo la colocación de sensores fijos en las alturas técnicas establecidas (1.3 m, 1.5 m y 1.8 m), elegidas de acuerdo con los criterios relacionados con la respiración, el comportamiento físico de los gases y la regulación sectorial. El sistema puesto en marcha demostró ser factible, asequible y eficaz para la pequeña minería, permitiendo un funcionamiento constante con registro automático y alertas que se pueden oír y ver sin requerir una infraestructura adicional complicada.

Luego del proceso de medición de antes y después de la implementación de sensores se registró un descenso significativo en el total de alarmas por niveles instaladas en el frente modelo, las disminuciones fueron del 62 % al 72 % para el oxígeno (O_2) y entre el 60 % y el 66 % para el monóxido de carbono (CO). Asimismo, las urgencias relacionadas con ambos gases se redujeron en un 100%, mientras que la frecuencia de incidentes relacionados con la ventilación y la exposición a la atmósfera varió entre un 50% y un 100%, según el sector

inspeccionado. Estos hallazgos demuestran que el sistema no solo sustituyó la detección manual y ocasional por un mecanismo de alerta automática permanente, sino que también mejoró la capacidad para actuar operativa y preventivamente. En general, los resultados indican que el monitoreo inteligente ayuda a disminuir de manera directa el peligro de intoxicación, hipoxia y exposición acumulativa. La aplicación del sistema no solo contribuye con la seguridad de los trabajadores, sino que también repercute favorablemente con los costos que se podrían generar por sanciones o gastos en sistemas de ventilación forzados.

Los datos permiten sostener que la puesta en marcha del sistema de monitoreo ambiental con sensores inteligentes incrementa notoriamente la seguridad en operaciones mineras subterráneas pequeñas, al proporcionar datos constantes, advertencias anticipadas y control efectivo de gases cruciales, lo cual demuestra que su implementación es viable desde el punto de vista técnico y económico, particularmente para frentes que presentan restricciones de ventilación y supervisión constante.

4.2 RECOMENDACIONES

Expandir el alcance del sistema a otros sectores operativos de la minería, añadiendo sensores combinados de O_2 + CO en áreas de trabajo directo y sensores adicionales de CO en galerías intermedias, utilizando la capacidad de expansión de la red LoRaWAN sin que sea preciso cambiar la infraestructura ya existente.

Para garantizar la continuidad operativa del sistema y la exactitud de las lecturas, es necesario establecer un protocolo de mantenimiento preventivo que contemple revisiones de alarmas, verificación de baterías, limpieza de sensores y calibraciones trimestrales con gases patrón.

Capacitar a los técnicos operadores y personal a cargo de la supervisión para el manejo, revisión del sistema e interpretación de las alarmas identificadas e implementación de procedimientos de seguridad.

Promover la adopción de tecnologías semejantes en otras operaciones de minería pequeña, mostrando que es factible realizar soluciones inteligentes, económicas y eficaces que ayuden a la protección de la vida humana en espacios confinados y al cumplimiento normativo (DS 024- 2016-EM).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BBC News Mundo. (2023, mayo 8). *Tragedia en Yanaquihua: al menos 27 trabajadores mueren en incendio en mina artesanal en Perú*. https://bbc.com

Cacciuttolo, C., et al. (2024). *Internet of Things Long-Range-Wide-Area-Network-Based Systems for Underground Mining: A Feasibility Review*. *Sensors*. https://doi.org/10.3390/s24061691

El Comercio. (2023, mayo 7). *Arequipa: 27 mineros fallecen tras incendio en socavón de Yanaquihua*. https://elcomercio.pe

El Comercio. (2025, marzo 22). *Ayacucho: Dos trabajadores de mina fallecen por inhalación de gases tóxicos*. El Comercio.

Fernández, L., & Salazar, P. (2020). *Análisis económico de sistemas de monitoreo ambiental en minería subterránea de pequeña escala*. *Revista Latinoamericana de Ingeniería Minera*, 12(2), 45–56.

Gestión. (2023, mayo 9). *Arequipa: Los 27 mineros murieron intoxicados por monóxido de carbono, confirma Fiscalía*. Gestión.

Gupta, R., & Misra, S. (2020). *Wireless monitoring technologies for underground mines*. *Journal of Mining Technology*, 45(2), 115–128.

Holton, C., Passmore, D., & Hall, E. (2021). *Industrial sensing technologies and safety performance in mining operations*. *Journal of Mining Safety Engineering*, 38(2), 115–130.

International Labour Organization. (2018). *Safety and health in mines*. ILO.

ISO. (2018). *ISO 6145-1: Gas analysis—Preparation of calibration gas mixtures—Part 1: Gravimetric method*. International Organization for Standardization.

Kumar, P. P., et al. (2023). *Development of LoRa communication system for effective underground gas monitoring*. *Processes*, 11(6), 1691. https://doi.org/10.3390/pr11061691

Liu, H., Zhang, Y., & Chen, X. (2018). *Automated ventilation control in underground mines using gas sensor networks*. *Journal of Mining Safety Engineering*, 7(3), 120–133.

Martínez, A., & López, D. (2020). *Detección temprana de monóxido de carbono mediante sensores electroquímicos en minería subterránea*. *Revista de Seguridad Minera*, 8(1), 22–31.

Ministerio de Energía y Minas. (2023, mayo 7). *Informe preliminar sobre el accidente en la Unidad Minera La Esperanza – Yanaquihua Mining Company S.A.C.* Gobierno del Perú. https://www.gob.pe/minem

National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). (2023). *Criteria for a recommended standard: Underground mine ventilation*. U.S. Department of Health and Human Services.

Occupational Safety and Health Administration (OSHA). (2022). *Toxic and hazardous substances: Limits for airborne contaminants*. U.S. Department of Labor.

OSINERGMIN. (2025). *Boletín de accidentes mortales — Gerencia de Supervisión Minera*. OSINERGMIN.

Paredes, J., & Quispe, L. (2022). *Implementación de sistemas de bajo costo para el control ambiental en minería artesanal y de pequeña escala*. *Revista de Ingeniería Minera*, 12(1), 34–48.

Quispe, R., & Aguilar, J. (2022). *Incidencia de gases nocivos en accidentes laborales en operaciones mineras subterráneas*. *Revista Peruana de Ingeniería y Ambiente*, 5(4), 55–67.

Rojas, M., Torres, E., & Delgado, S. (2021). *Desempeño de sensores portátiles de oxígeno en minas subterráneas de mediana escala*. *Revista Andina de Tecnología Minera*, 4(2), 33–41.

Santos, P., & Herrera, F. (2019). *Redes inalámbricas de bajo consumo para monitoreo de ambientes subterráneos*. *Ingeniería y Desarrollo Tecnológico*, 15(1), 71–85.

SERNAGEOMIN. (2019). *Guía de seguridad para labores subterráneas*. Servicio Nacional de Geología y Minería.

Universitat Politècnica de Catalunya. (2023). *Low-Cost Sensor Technologies for Monitoring*. UPC Technical Report.

Villarroel, A., & Guerra, P. (2021). *Métodos aplicados para la mejora de condiciones de seguridad en minería subterránea*. *Revista Latinoamericana de Prevención de Riesgos*, 8(3), 52–66.

ResearchGate Contributors. (2022). *On Underground Coal Mine Environment Monitoring with LoRa Range Extension (RTEPMS).* ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication

ResearchGate Contributors. (2023). *Implementation of Environmental Parameters Monitoring and Alert System for Underground Mining Using IoT with LoRa Technology. ResearchGate.* https://www.researchgate.net/publication

ANEXOS

ANEXO 01: MONITOREO SEMANAL LINEA BASE

Tabla 21
Tabla de monitoreo semanal de línea base (12 semanas)

Tabla Semana	P1 Bocamina O_2 (%)	P1 CO (ppm)	P2 Galería O_2 (%)	P2 CO (ppm)	P3 Frente O_2 (%)	P3 CO (ppm)	Observaciones
1	20.6	4	19.3	18	18.9	32	Riesgo en frente: bajo O_2 y CO elevado
2	20.7	5	19.4	16	19.0	28	CO alto en frente
3	20.5	3	19.2	20	18.8	34	O_2 < 19.5 % en P2 y P3
4	20.6	4	19.5	15	19.1	27	Valores límite P2
5	20.7	6	19.4	22	18.9	30	CO en aumento por ventilación deficiente
6	20.8	4	19.3	19	18.7	35	CO peligroso en P3
7	20.6	3	19.4	17	19.0	26	Tendencia estable
8	20.5	5	19.3	21	18.8	33	Deficiencia recurrente O_2
9	20.7	4	19.4	18	18.9	29	Ventilación irregular
10	20.6	3	19.3	20	18.7	36	Riesgo crítico CO en P3
11	20.6	5	19.2	19	18.9	31	P2 requiere mejora
12	20.7	4	19.3	17	19.0	28	Condiciones siguen irregulares

Nota. Los resultados muestran que, durante el periodo de línea base, los niveles de oxígeno en el frente de avance (P3) se mantuvieron repetidamente por debajo del límite mínimo

permitido de 19.5 %, alcanzando valores tan bajos como 18.7 %, lo cual representa un riesgo directo de asfixia y fatiga metabólica para el personal.

En cuanto al monóxido de carbono, múltiples semanas registraron valores superiores al LMP de 25 ppm, especialmente en el frente, donde se identificaron concentraciones de hasta 36 ppm, asociadas principalmente a gases de combustión de maquinaria diésel y ventilación insuficiente.

Estos hallazgos justifican de manera sólida la implementación de un sistema fijo de monitoreo continuo, debido a:

- Alta variabilidad semanal, difícil de detectar con mediciones esporádicas.
- Condiciones peligrosas recurrentes, especialmente en el frente de avance.
- Limitación de los detectores portátiles, que solo registran mediciones instantáneas.
- Necesidad de alertas en tiempo real, que permitan que permitan acción inmediata.

ANEXO 02: ESQUEMA COMPARATIVO: LORA VS LORAWAN

Tabla 22
Esquema comparativo: LoRa vs LoRaWAN

Característica	LoRa	LoRaWAN
Definición	Técnica de modulación de radio de largo alcance y bajo consumo.	Protocolo de red que utiliza LoRa como capa física para conectar dispositivos, gateways y servidores.
Nivel en el modelo OSI	Capa física (PHY)	Capa de red y aplicación.
Función principal	Transmitir señales inalámbricas a larga distancia con bajo consumo energético.	Gestionar la comunicación entre nodos, gateways y servidores, incluyendo seguridad y direccionamiento.
Alcance típico	2–5 km en áreas urbanas, hasta 15 km en áreas rurales.	Depende de LoRa, pero permite estructurar redes de múltiples nodos y gateways.
Consumo energético	Muy bajo (ideal para sensores alimentados por batería).	Bajo, optimizado para redes IoT con miles de dispositivos.
Seguridad	No incluye mecanismos de seguridad	Incluye cifrado AES de extremo a extremo y autenticación de dispositivos.
Escalabilidad	Limitada a la transmisión punto a punto	Alta: permite integrar miles de sensores en una misma red.
Ejemplo de uso	Comunicación directa entre dos dispositivos.	Sistema de monitoreo ambiental en minería subterránea con sensores O_2 y CO conectados a un gateway.

Nota. El sistema de monitoreo ambiental no se limita a la modulación LoRa, sino que requiere la arquitectura completa de LoRaWAN, porque:

- Los sensores electroquímicos de O_2 y CO se comunican con un gateway LoRaWAN en la bocamina.
- El gateway transmite los datos al servidor del supervisor en superficie.
- Se garantiza seguridad, trazabilidad y escalabilidad para ampliar la red en el futuro.