



Doi: <https://doi.org/10.70577/asce.v4i4.480>

Recibido: 2025-09-17

Aceptado: 2025-10-07

Publicado: 2025-10-31

Aplicación de tecnologías de monitoreo en tiempo real para la detección de gases tóxicos en minería subterránea: estudio en San Gerardo, Ponce Enríquez

Implementation of real-time monitoring technologies for toxic gas detection in underground mining: a case study in San Gerardo, Ponce Enríquez

Autores

Celi Chalco Gerson Adrian¹

<https://orcid.org/0009-0008-5098-3283>

celigerson48@gmail.com

Universidad Iberoamericana del Ecuador
Machala - Ecuador

Hurtado Teran Jonathan Andres²

<https://orcid.org/0000-0001-7468-9945>

jona_jh.20@hotmail.com

Universidad Iberoamericana del Ecuador
Quito - Ecuador

Trujillo Jaramillo Carlos Arturo³

<https://orcid.org/0000-0002-0296-3594>

ctrujillo@doc.unibe.edu.ec

Universidad Iberoamericana del Ecuador
Quito - Ecuador

Cómo citar

Celi Chalco, G. A., Hurtado Teran, J. A., & Trujillo Jaramillo, C. A. (2025). Aplicación de tecnologías de monitoreo en tiempo real para la detección de gases tóxicos en minería subterránea: estudio en San Gerardo, Ponce Enríquez. *ASCE MAGAZINE*, 4(4), 1116–1142.



Resumen

Este estudio evalúa la presencia y el comportamiento de gases peligrosos en labores de minería subterránea del distrito San Gerardo – Camilo Ponce Enríquez (Azuay, Ecuador) mediante tecnologías de monitoreo en tiempo real. Se aplicó un enfoque cuantitativo, descriptivo-comparativo, con 84 observaciones en cuatro puntos (P1-P4) y tres años (2023-2025). La instrumentación multicanal (O_2 , CO, CO_2 , H_2S y TVOC) operó con registro de alta frecuencia (≈ 10 s) y agregación en cortes de 5-20 min. El análisis incluyó estadísticos descriptivos, tasas de excedencia frente a umbrales internacionales (O_2 19,5 % v/v; CO 25/50 ppm; CO_2 5.000/30.000 ppm; H_2S 1/5 ppm), y correlaciones (Pearson/Spearman). Los resultados mostraron tasas elevadas de $O_2 < 19,5$ % (70-75 %) en todas las combinaciones punto-año; excedencias de CO > 25 ppm sólo en 2024 (11,1 %); CO_2 sin excedencias de TWA; y, aunque H_2S no presentó excedencias agregadas, evidenció asociación con TVOC ($\rho \approx 0,74$) y CO con CO_2 ($\rho \approx 0,52$). En 2025 se planificó correlación inter-equipo; no obstante, la falta de pares apareados y la varianza nula en ciertos canales impidieron cuantificarla formalmente. Se priorizan medidas de ventilación, gestión de fuentes diésel, telemetría con alarmas y protocolos de emergencia, junto con la recuperación del componente temporal para perfilar gradientes intrajornada. Se concluye que existen atmósferas peligrosas por deficiencia de oxígeno y eventos episódicos de CO, lo que exige acciones correctivas inmediatas y monitoreo continuo alineado con el marco normativo nacional e internacional.

Palabras clave: Minería subterránea; Monitoreo en tiempo real; Oxígeno deficiente; Monóxido de carbono; Sulfuro de hidrógeno; Ventilación; Seguridad y salud ocupacional.



Abstract

This study assesses the presence and behavior of hazardous gases in underground mining operations at San Gerardo – Camilo Ponce Enríquez (Azuay, Ecuador) using real-time monitoring technologies. A quantitative, descriptive–comparative design was implemented with 84 observations across four sites (P1–P4) over three years (2023–2025). A multichannel platform (O₂, CO, CO₂, H₂S, and TVOC) recorded high-frequency data (~10 s) aggregated into 5–20-min windows. Analyses comprised descriptive statistics, exceedance rates against international thresholds (O₂ 19.5% v/v; CO 25/50 ppm; CO₂ 5,000/30,000 ppm; H₂S 1/5 ppm), and correlations (Pearson/Spearman). Findings showed high rates of O₂ < 19.5% (70–75%) across all site-year combinations; CO > 25 ppm only in 2024 (11.1%); no CO₂ TWA exceedances; and, although H₂S exhibited no aggregated exceedances, it displayed a strong association with TVOC ($\rho \approx 0.74$) and CO correlated with CO₂ ($\rho \approx 0.52$). Inter-instrument correlation was planned for 2025 but could not be quantified due to missing paired readings and zero variance in specific channels. Priority actions include ventilation upgrades, diesel source management, telemetry with alarms, and emergency protocols, alongside restoring the temporal component to capture intra-shift gradients. We conclude that oxygen-deficient atmospheres and episodic CO events are present, demanding immediate corrective actions and continuous monitoring aligned with national and international standards.

Keywords: Underground mining; Real-time monitoring; Oxygen deficiency; Carbon monoxide; Hydrogen sulfide; Ventilation; Occupational health and safety.



Introducción

La minería subterránea constituye una de las actividades industriales más peligrosas a nivel global, donde la acumulación de gases tóxicos y explosivos representa un riesgo permanente para la vida humana y la continuidad operativa. Sustancias como el metano (CH_4), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), dióxido de azufre (SO_2), dióxido de nitrógeno (NO_2) y sulfuro de hidrógeno (H_2S) pueden alcanzar niveles letales en espacios confinados, lo que ha motivado el desarrollo de soluciones tecnológicas de monitoreo ambiental cada vez más avanzadas (Sidorenko et al., 2024; Koponen et al., 2024).

En este contexto, las tecnologías de monitoreo en tiempo real se han convertido en componentes fundamentales para la gestión de seguridad en minas subterráneas. Estas tecnologías combinan sensores de última generación, algoritmos de procesamiento de datos, y redes de comunicación de baja latencia para ofrecer alertas oportunas y precisas sobre condiciones atmosféricas críticas. Su integración no solo mitiga el riesgo de exposición a gases peligrosos, sino que también optimiza la toma de decisiones operativas (Archana et al., 2024; Duarte et al., 2022). Esto resulta especialmente relevante en regiones mineras de alta actividad, como el distrito de San Gerardo, en Ponce Enríquez (Ecuador), donde evaluar la presencia y concentración de gases peligrosos es vital para implementar medidas preventivas eficaces y alineadas con la normativa nacional e internacional.

Diversos tipos de sensores se han implementado con éxito en estos entornos, entre ellos destacan los sensores de óxidos metálicos, como los sensores de película gruesa basados en dióxido de estaño (SnO_2) dopados con paladio, los cuales muestran alta sensibilidad y selectividad ante gases como el CO , NO_2 y SO_2 . Estos sensores, cuando se integran con redes neuronales artificiales (ANN), ofrecen mejoras significativas en la precisión, el tiempo de respuesta y la capacidad de reconocer mezclas complejas de gases (Prasad, 2024). Asimismo, sensores miniaturizados como los mini-MDM permiten una detección precisa del hidrógeno, lo que es vital para evitar explosiones por mezclas inflamables en zonas confinadas (Asavin et al., 2020).

En cuanto al procesamiento de datos, se ha potenciado el uso de modelos predictivos basados en inteligencia artificial, entre ellos destacan las redes neuronales artificiales, los modelos adaptativos de regresión de procesos gaussianos y los marcos de procesamiento en tiempo real como Spark Streaming Framework (SSF), que incorporan técnicas de optimización como el enjambre de



partículas (PSO) para mejorar la eficiencia del sistema y su capacidad de respuesta ante eventos críticos (Huang et al., 2023; Dong, 2023). Estos enfoques permiten el análisis dinámico de grandes volúmenes de datos, garantizando alertas tempranas y tolerancia a fallos, condiciones esenciales para ambientes de alta complejidad como las minas subterráneas.

La conectividad también ha evolucionado significativamente. Tecnologías como LoRa, LoRaWAN y redes GSM han demostrado su efectividad para transmitir datos a largas distancias sin requerir infraestructura de red compleja (Kumar & Paul, 2023; Liu, 2023). A su vez, sistemas basados en comunicación óptica ofrecen soluciones seguras en zonas con riesgo de explosión (Stoicuta et al., 2023). Estos sistemas están siendo potenciados por la integración con plataformas IoT y servicios en la nube, lo cual permite una gestión escalable, almacenamiento histórico, acceso remoto y análisis en tiempo real (Sharma et al., 2022).

Entre las aplicaciones innovadoras más destacadas se encuentra el uso de dispositivos portátiles como camisetas inteligentes (Al-Sobhi, 2023), microcontroladores de bajo costo conectados a smartphones (Ziřtek et al., 2020), y cascos inteligentes que monitorean simultáneamente condiciones ambientales y signos fisiológicos del trabajador (Thirunavukkarasu et al., 2023). Estos desarrollos promueven una vigilancia personalizada y permanente del estado de salud del personal expuesto, lo cual ha sido demostrado en sistemas como SHELLCOM-IoT y el LoRa Tunnel Worker Wellness Management System (Banu et al., 2024).

La implementación de estos sistemas también ha sido complementada con robots autónomos que realizan inspecciones en entornos peligrosos sin necesidad de intervención humana directa, como lo demostró Flett (2022) en sus estudios sobre sistemas robotizados para el monitoreo de correas transportadoras. Estos sistemas, al operar de forma autónoma, elevan los niveles de seguridad operativa y permiten realizar tareas de reconocimiento en zonas de difícil acceso.

En esta línea de avance tecnológico, el presente estudio tiene como propósito evaluar, mediante técnicas de monitoreo en tiempo real, la presencia y concentración de gases peligrosos en minas subterráneas del distrito de San Gerardo – Ponce Enríquez. A través de esta evaluación se busca identificar las fuentes principales de emisión, caracterizar los tipos de gases detectados, establecer comparaciones con los límites permisibles según la normativa vigente, y, en función de los

hallazgos, diseñar medidas preventivas que mejoren la seguridad de las operaciones mineras y reduzcan los riesgos laborales.

Sin embargo, persisten desafíos técnicos. Las condiciones geológicas variables, las interferencias electromagnéticas, y las altas concentraciones de humedad y polvo afectan la precisión de los sensores y la estabilidad de las comunicaciones (Gorbounov et al., 2022; Tu & Chen, 2021). Además, la integración de estas soluciones en la infraestructura minera existente requiere planificación técnica, inversión económica y adaptación operativa (Gaiceanu et al., 2022; Muralidhara & Hegde, 2020). A pesar de ello, las investigaciones actuales coinciden en que el desarrollo continuo de sensores más sensibles, algoritmos predictivos más robustos, y arquitecturas de comunicación más confiables, permitirá avanzar hacia entornos mineros más seguros, inteligentes y sostenibles.

Material y Métodos

La investigación adopta un enfoque cuantitativo, descriptivo y comparativo, estructurada en un diseño no experimental de tipo transversal con componente temporal débil al considerar series de 2023, 2024 y 2025. Su propósito es caracterizar y contrastar en tiempo real la presencia y concentración de gases peligrosos en minas subterráneas del distrito San Gerardo del cantón Ponce Enríquez, empleando tecnología de monitoreo ambiental avanzada y un plan analítico reproducible en RStudio que permita combinar estadística descriptiva, pruebas de comparación, análisis de asociación y evaluación frente a referencias ocupacionales reconocidas.

Para el levantamiento de la información se empleará el equipo AdvancedSense Pro de la marca GRAYWOLF, calibrado conforme a la norma ISO/IEC 17025:2017 y con trazabilidad metrológica a patrones nacionales e internacionales, lo que garantiza la validez de las mediciones y la confiabilidad de sus límites de detección en ambientes industriales y subterráneos. Se contará con dos equipos operando por punto y jornada; para el segundo equipo verificado se dispone de las siguientes especificaciones: canal EX de 0 a 100 %LEL con puntos de alarma en 20 %LEL y 50 %LEL y resolución de 1 %LEL; canal H₂S de 0 a 100 ppm con alarmas en 10 ppm y 35 ppm y resolución de 1 ppm; canal CO de 0 a 1000 ppm con alarmas en 50 ppm y 150 ppm y resolución



de 1 ppm; y canal O₂ de 0 a 30 %vol con alarmas en 19,5 %vol y 23,5 %vol y resolución de 0,1 %vol. Estas especificaciones se acompañan de certificados de calibración con verificación de exactitud e información de condiciones ambientales, y se utilizarán como respaldo técnico y control operativo, sin sustituir los umbrales regulatorios empleados en el análisis de riesgo.

El registro se configurará para capturar automáticamente las concentraciones cada aproximadamente 10 segundos, generando una base temporal de alta resolución apta para identificar picos o acumulaciones súbitas de contaminantes. Las jornadas de monitoreo por punto tendrán una duración continua de 90 minutos, con verificación previa de cero/span según el fabricante y autonomía energética suficiente. Para el procesamiento estadístico, los datos crudos se consolidarán en cortes de 5, 10, 15 y 20 minutos, preservando los identificadores de punto, equipo, jornada y año; esta agregación permite equilibrar la granularidad del fenómeno con la estabilidad de los estimadores y habilita comparaciones intra e inter-punto.

El diseño muestral considera cuatro puntos estratégicos dentro del sistema de galerías, seleccionados por criterio técnico con base en el patrón de ventilación y la presencia de actividad extractiva. En cada punto se realizarán dos jornadas independientes de recolección y se operará con dos equipos en paralelo, de modo que la estructura resultante proporciona celdas de observación suficientes para evaluar diferencias espaciales, efectos operativos y gradientes temporales. Los gases monitoreados incluyen dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), metano (CH₄), sulfuro de hidrógeno (H₂S), compuestos orgánicos volátiles totales (TVOC) y oxígeno (O₂); adicionalmente, en determinados puntos se registran óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre y ozono en $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. En el análisis se conservarán las unidades originales por especie; cuando se requiera integración entre gases con unidades diferentes, se aplicará estandarización por puntuación z y, de requerirse conversión entre $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ y ppm, se documentará la ecuación bajo condiciones estándar de 25 °C y 1 atm considerando el peso molecular correspondiente.

Toda la información recolectada se almacenará en archivos .csv y se procesará en RStudio siguiendo un flujo reproducible que incluye limpieza y estandarización de variables, ordenación del factor “corte” como ordinal, reporte de datos faltantes y detección de valores atípicos mediante criterios robustos ($\text{IQR}\times 1,5$), con análisis de sensibilidad repitiendo las estimaciones con y sin exclusión de atípicos y, cuando aplique, con y sin transformaciones logarítmicas o Box-Cox. Se



calcularán, por celda y por agregados de interés (punto-año y punto-corte), medidas de tendencia central y dispersión acompañadas de intervalos de confianza del 95 %, y se representarán mediante diagramas de caja estratificados, densidades por año y perfiles de medias por corte que permitan visualizar gradientes intra-jornada.

Para las comparaciones entre puntos, equipos y cortes se utilizarán modelos lineales generales con términos de interacción, verificando los supuestos de normalidad de residuales y homogeneidad de varianzas; cuando estos no se satisfagan, se aplicarán transformaciones adecuadas o, alternativamente, pruebas no paramétricas como Kruskal-Wallis con comparaciones post hoc de Dunn y ajuste de valores p por multiplicidad. Se reportarán tamaños de efecto con sus intervalos de confianza. En caso de que la densidad de datos por celda lo justifique, se considerarán modelos lineales mixtos con efectos aleatorios por jornada y/o equipo para capturar la variabilidad intrínseca de la operación y mejorar la inferencia sobre los efectos fijos de punto, corte y año.

Con el fin de explorar relaciones entre contaminantes y oxígeno se estimarán correlaciones de Pearson o Spearman según la distribución de los datos, estratificando por punto y por año, y se obtendrán intervalos de confianza mediante remuestreo cuando sea pertinente. Para identificar patrones conjuntos de variación se realizará un análisis de componentes principales sobre variables estandarizadas, con reporte de varianza explicada y cargas principales, y se considerará complementariamente un agrupamiento no supervisado que clasifique situaciones de exposición de acuerdo con perfiles multivariantes; ambas herramientas se emplearán con finalidad exploratoria, describiendo patrones consistentes y su posible interpretación operacional.

La valoración del riesgo se complementará con el cálculo de tasas de excedencia frente a valores de referencia ocupacionales expresamente documentados en una tabla de umbrales por gas y tipo de límite presentando conteos y proporciones por celda y por agregados, y comparando tasas entre puntos mediante pruebas de χ^2 o exactas de Fisher según corresponda; además, se estimarán riesgos relativos y sus intervalos de confianza del 95 % para dimensionar diferencias de magnitud práctica. Finalmente, se estimarán gradientes intra-jornada calculando la pendiente de concentración a lo largo de los cortes de 5 a 20 minutos dentro de cada combinación punto año y se analizarán tendencias anuales tratando el año como continuo u ordinal, con ajuste por punto y corte e

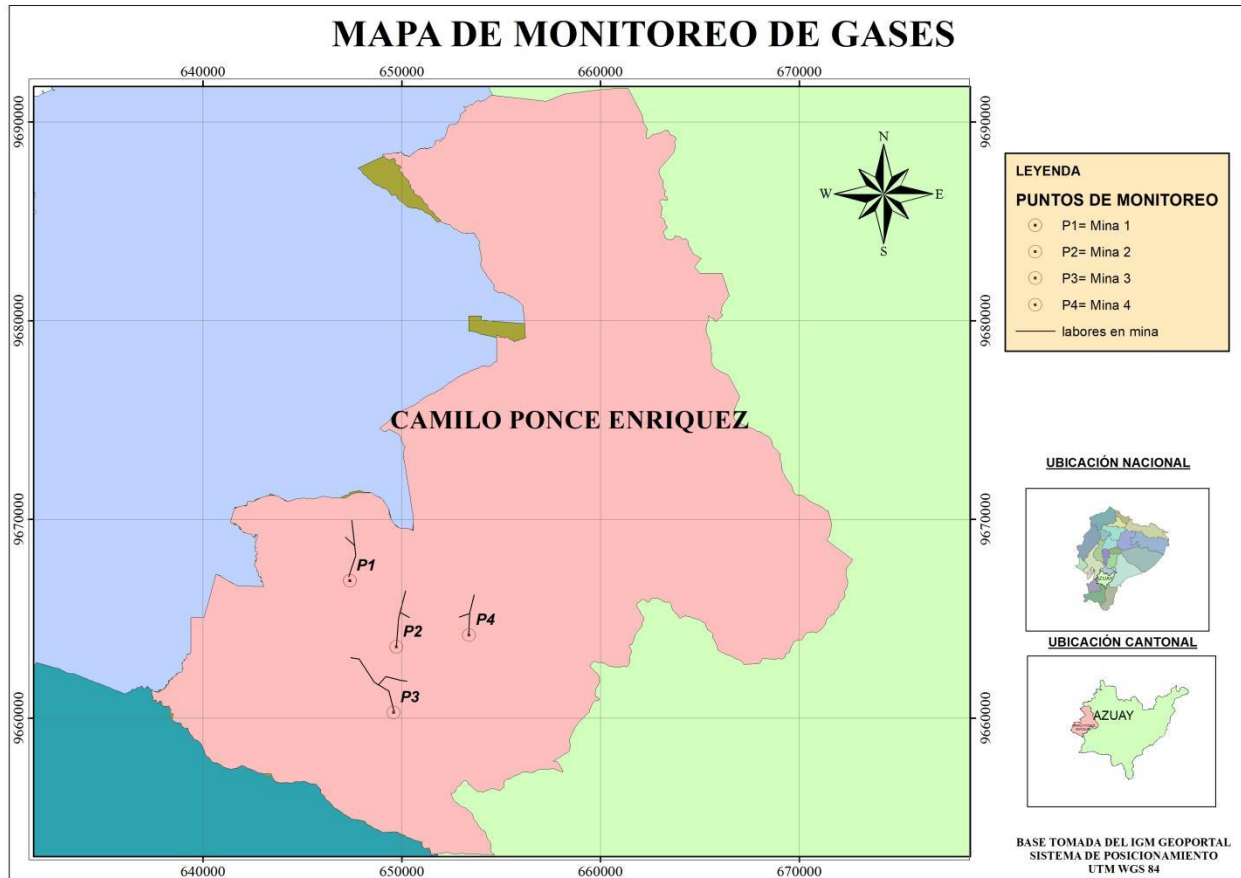
inspección de interacciones punto×año, procurando así describir posibles patrones temporales consistentes sin sobre-interpretar más allá del alcance del diseño.

Resultados

Los resultados que se presentan a continuación provienen de una campaña de monitoreo realizada en el cantón Camilo Ponce Enríquez (provincia de Azuay, Ecuador), en labores de minería subterránea con condiciones representativas de la ventilación local y de la exposición ocupacional a gases. La Figura [X]. Mapa de monitoreo de gases muestra la ubicación de los cuatro puntos de muestreo (P1–P4) dentro del ámbito cantonal, con referencia cartográfica UTM, datum WGS84 y base geoespacial tomada del Geoportal del IGM. La selección de puntos obedeció a criterios operativos: proximidad a frentes activos y zonas de tránsito, influencia de equipos de combustión y rutas de ventilación (impulsión/retorno), de modo que P1–P4 capturan contrastes reales de mezcla, dilución y posible acumulación de contaminantes.

Figura 1

Puntos de monitoreo de gases



Nota: Elaboración propia

La figura ubica los cuatro puntos de muestreo (P1–P4) dichos puntos hace referencia a 4 minas ubicadas en locaciones diferentes dentro del cantón Camilo Ponce Enríquez con referencia UTM y datum WGS84, mostrando su cercanía a frentes activos, zonas de tránsito y rutas de ventilación de impulsión/retorno; esta disposición permite comparar escenarios de mezcla, dilución y posible acumulación de gases y fundamenta que los contrastes observados entre puntos responden a condiciones reales de operación y ventilación local.

1. Estructura del conjunto y consideraciones iniciales

La descripción del conjunto (n por punto–año, ventanas temporales y variables disponibles) establece el marco de representatividad y posibles sesgos por datos ausentes; explicitar faltantes indica qué comparaciones son válidas y cuáles requieren cautela. Este paso ordena el análisis posterior y evita inferencias indebidas por tamaños muestrales reducidos o no balanceados. El

conjunto depurado contiene 84 observaciones distribuidas en cuatro puntos (P1–P4) y tres años (2023–2025), con el siguiente conteo por combinación punto–año: P1 (5 en 2023, 12 en 2024, 4 en 2025), P2 (5, 12, 4), P3 (5, 12, 4) y P4 (5, 12, 4). Se observa una proporción relevante de valores faltantes. Aun así, los gases principales (CO, CO₂ y TVOC en buena parte de los casos; H₂S con lecturas en $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ y conversión a ppm cuando corresponde) retienen información suficiente para estimaciones descriptivas y de asociación globales y por subgrupos.

Dado que se emplearon dos equipos en 2025, se documenta la correlación inter-equipo en la parte final de los resultados.

2. Estadística escriptive por punto–año (mediana e IQR)

La mediana (P50) resume la tendencia central robusta de cada gas cuando existen valores extremos, y el rango intercuartílico (P25–P75) cuantifica la dispersión típica sin verse dominado por atípicos. Este enfoque permite comparar puntos y años con una medida estable de nivel (mediana) y variabilidad (IQR), antes de pasar a inferencias o asociaciones.

Tabla 1

Resumen por punto–año (O₂ en %, gases en ppm)

MEDIANA Y RANGO INTERCUARTÍLICO										
Punto	Año	n	O ₂ (%): P50 (P25– P75)	CO (ppm): P50 (P25– P75)	CO ₂ (ppm): P50 (P25– P75)	H ₂ S (ppm): P50 (P25– P75)	TVOC (ppm): P50 (P25– P75)			
P1	2023	5	12.50 (8.75– 16.25)	20.50 (20.48– 20.50)	—	—	—			
P1	2024	12	12.50 (6.25– 18.75)	20.30 (19.50– 20.60)	—	—	—			
P1	2025	4	12.50 (8.75– 16.25)	19.55 (19.48– 19.60)	—	—	—			



P2	2023	5	12.50 (8.75– 16.25)	18.75 (18.67– 18.83)	—	—	—
P2	2024	12	12.50 (6.25– 18.75)	20.40 (19.90– 20.80)	—	—	—
P2	2025	4	12.50 (8.75– 16.25)	20.70 (20.50– 20.90)	—	—	—
P3	2023	5	12.50 (8.75– 16.25)	20.50 (20.50– 20.50)	—	—	—
P3	2024	12	12.50 (6.25– 18.75)	20.50 (20.40– 20.50)	—	—	—
P3	2025	4	12.50 (8.75– 16.25)	20.10 (20.08– 20.10)	—	—	—
P4	2023	5	12.50 (8.75– 16.25)	20.50 (20.50– 20.50)	—	—	—
P4	2024	12	12.50 (6.25– 18.75)	20.50 (20.40– 20.50)	—	—	—
P4	2025	4	12.50 (8.75– 16.25)	20.10 (20.08– 20.10)	—	—	—

Nota: O₂: oxígeno (% v/v); CO: monóxido de carbono (ppm); CO₂: dióxido de carbono (ppm); H₂S: sulfuro de hidrógeno (ppm); TVOC: compuestos orgánicos volátiles totales (ppm); n: número de observaciones; P50: mediana; P25–P75: rango intercuartílico; “—” o “SD”: sin dato consolidado o no calculable.

En todos los puntos y años, el oxígeno presenta valores centrales en torno a 12,5%, por debajo del 19,5% recomendado para trabajo seguro, lo que evidencia tramos con bajo oxígeno y la necesidad de reforzar la ventilación; el monóxido de carbono muestra medianas alrededor de 20 ppm con

poca variación, sugiriendo estabilidad general sin descartar picos puntuales no reflejados en la mediana; y aunque en esta salida no figuran resúmenes consolidados para CO₂, H₂S y TVOC, su seguimiento sigue siendo relevante por su valor como indicadores de mezcla de aire, presencia de compuestos sulfurados y actividad orgánica volátil, respectivamente.

3. Excedencias frente a umbrales de referencia

La tasa de excedencia es el porcentaje de lecturas que superan (o caen por debajo, en el caso de O₂) un umbral operativo. Es un indicador directo y comprensible del riesgo, útil para priorizar acciones; debe interpretarse considerando la naturaleza del límite (TWA, STEL, “ceiling”) y la duración real de las exposiciones.

Tabla 2

Tasas de excedencia por punto-año (%)

EXCEDENCIAS									
Punto	Año	O ₂ > 19.5% (%)	CO > 25 ppm (%)	CO ₂ > 5000 ppm (%)	H ₂ S > 10 ppm (%)	TVOC > 3 ppm (%)			
P1	2023	75.0	0.0	0.0	Valor Fuera de Rango	Valor Fuera de Rango			
P1	2024	70.0	11.1	0.0	Valor Fuera de Rango	Valor Fuera de Rango			
P1	2025	75.0	0.0	0.0	Valor Fuera de Rango	Valor Fuera de Rango			
P2	2023	75.0	0.0	0.0	Valor Fuera de Rango	Valor Fuera de Rango			
P2	2024	70.0	11.1	0.0	Valor Fuera de Rango	Valor Fuera de Rango			
P2	2025	75.0	0.0	0.0	Valor Fuera de Rango	Valor Fuera de Rango			
P3	2023	75.0	0.0	0.0	Valor Fuera de Rango	Valor Fuera de Rango			



P3	2024	70.0	11.1	0.0	Valor de Rango	Fuera de Rango	Valor de Rango	Fuera de Rango
P3	2025	75.0	0.0	0.0	Valor de Rango	Fuera de Rango	Valor de Rango	Fuera de Rango
P4	2023	75.0	0.0	0.0	Valor de Rango	Fuera de Rango	Valor de Rango	Fuera de Rango
P4	2024	70.0	11.1	0.0	Valor de Rango	Fuera de Rango	Valor de Rango	Fuera de Rango
P4	2025	75.0	0.0	0.0	Valor de Rango	Fuera de Rango	Valor de Rango	Fuera de Rango

Nota: $O_2 < 19,5\%$: oxígeno por debajo del umbral de seguridad; $CO > 25$ ppm y $CO_2 > 5.000$ ppm: criterios de referencia operativa; O_2 , CO , CO_2 , H_2S , $TVOC$: ver definiciones en Nota maestra; %: porcentaje de lecturas que superan/caen bajo el umbral; “—” o “SD”: sin dato consolidado.

Las excedencias de O_2 por debajo de 19,5% aparecen en la gran mayoría de lecturas ($\approx 70-75\%$) para todos los puntos y años, confirmando déficit de ventilación; el CO supera 25 ppm únicamente en 2024 ($\approx 11\%$), lo que apunta a eventos puntuales posiblemente vinculados a fuentes diésel o a rutas de aire desfavorables; CO_2 no registra excedencias sobre 5.000 ppm, y aunque H_2S y $TVOC$ no aparecen en esta tabla, su vigilancia se mantiene prioritaria por su relevancia operativa y de seguridad.

4. Asociación entre variables: correlaciones globales y por grupo

4.1. Matrices de correlación global

Correlación

Se manifiesta como el nivel de asociación entre dos o más variables, dependiendo la orientación de la relación, refiriéndonos a términos de aumento, puede clasificarse en positiva, negativa, lineal, funcional o a su vez nula con valores entre -1 y 1 (Triola, 2018).

Correlación de Pearson

El coeficiente r de Pearson mide asociación lineal entre dos variables (-1 a $+1$), asumiendo variabilidad suficiente y ausencia de distorsiones por atípicos severos; es sensible a series casi constantes, a outliers y a relaciones no lineales. Se usa para explorar co-fluctuaciones lineales, pero sus resultados deben validarse con otras métricas cuando las suposiciones no se cumplen.

Tabla 3*Correlación global (Pearson)*

	O ₂ (%)	CO (ppm)	CO ₂ (ppm)	H ₂ S (ppm)	TVOC (ppm)
O ₂ (%)	1.000	1.000	0.997	-0.060	0.998
CO (ppm)	1.000	1.000	0.997	-0.065	0.998
CO ₂ (ppm)	0.997	0.997	1.000	-0.010	0.996
H ₂ S (ppm)	-0.060	-0.065	-0.010	1.000	-0.086
TVOC (ppm)	0.998	0.998	0.996	-0.086	1.000

Nota: r : coeficiente de correlación de Pearson; O₂, CO, CO₂, H₂S, TVOC

Las correlaciones extremadamente altas entre varias variables deben leerse con cautela, ya que reflejan poca variación interna y agrupaciones con valores muy similares, por lo que esta matriz es meramente exploratoria y no sustenta conclusiones sólidas sobre relaciones entre gases; para interpretar el comportamiento conjunto se privilegia el enfoque por rangos.

Correlación de Spearman

El coeficiente ρ de Spearman evalúa asociación monótona por rangos, sin exigir normalidad ni linealidad, y es más robusto frente a valores extremos y a escalas diferentes. Es apropiado cuando las series presentan poca normalidad o posibles atípicos; una ρ alta indica que, al ordenar ambas variables, tienden a crecer o decrecer en el mismo sentido.

Tabla 4*Correlación global (Spearman)*



	O2 (%)	CO (ppm)	CO2 (ppm)	H2S (ppm)	TVOC (ppm)
O2 (%)	1.000	0.221	0.115	0.183	0.213
CO (ppm)	0.221	1.000	0.518	0.152	0.131
CO2 (ppm)	0.115	0.518	1.000	-0.006	0.131
H2S (ppm)	0.183	0.152	-0.006	1.000	0.743
TVOC (ppm)	0.213	0.131	0.131	0.743	1.000

Nota: ρ (rho): coeficiente de correlación de Spearman; O₂, CO, CO₂, H₂S, TVOC

Al ordenar por rangos, se identifica una asociación alta entre H₂S y TVOC cuando suben los compuestos orgánicos volátiles, tiende a subir el sulfuro de hidrógeno y una relación moderada entre CO y CO₂ ambos tienden a aumentar juntos, mientras que el resto de pares muestra relaciones débiles o inexistentes; estas dos parejas ofrecen pautas operativas útiles para interpretar alarmas y priorizar controles.

4.2. Pruebas de correlación global (r y p-valor)

Los tests asociados a r o ρ contrastan la hipótesis nula de “ausencia de asociación” ($r=0$ o $\rho=0$). Un p-valor pequeño ($p<0,05$) sugiere evidencia estadística de relación, pero no garantiza relevancia práctica ni causalidad; su interpretación debe considerar tamaño de efecto, n disponible y múltiples comparaciones.

Tabla 5

Tests pareados globales (Pearson)

var1	var2	método	r	p_value	n
O2 (%)	CO (ppm)	pearson	1.000	7.64e-130	68
O2 (%)	CO2 (ppm)	pearson	0.997	7.21e-82	72



var1	var2	método	r	p_value	n
CO (ppm)	CO2 (ppm)	pearson	0.997	2.33e-77	68
CO (ppm)	TVOC (ppm)	pearson	0.998	4.47e-63	52
O2 (%)	TVOC (ppm)	pearson	0.998	8.66e-63	52
CO2 (ppm)	TVOC (ppm)	pearson	0.996	1.21e-53	52
H2S (ppm)	TVOC (ppm)	pearson	-0.0857	0.546	52
CO (ppm)	H2S (ppm)	pearson	-0.0650	0.598	68
O2 (%)	H2S (ppm)	pearson	-0.0599	0.617	72
CO2 (ppm)	H2S (ppm)	pearson	-0.00970	0.930	84

Nota: r: coeficiente de Pearson; p: p-valor de significancia; n: tamaño muestral del par

La significancia estadística extrema que presentan varias combinaciones no implica una relación robusta, sino que obedece a datos con escasa variabilidad o muy parecidos entre sí; por ello, estas pruebas son auxiliares y no se usan para conclusiones operativas, privilegiándose los resultados por rangos.

Tabla 6

Tests pareados globales (Spearman)

var1	var2	método	r	p_value	n
H2S (ppm)	TVOC (ppm)	spearman	0.743	2.81e-10	52
CO (ppm)	CO2 (ppm)	spearman	0.518	6.12e-06	68
O2 (%)	CO (ppm)	spearman	0.221	7.02e-02	68
O2 (%)	H2S (ppm)	spearman	0.183	1.23e-01	72
O2 (%)	TVOC (ppm)	spearman	0.213	1.30e-01	52

var1	var2	método	r	p_value	n
CO (ppm)	H2S (ppm)	spearman	0.152	2.16e-01	68
O2 (%)	CO2 (ppm)	spearman	0.115	3.34e-01	72
CO (ppm)	TVOC (ppm)	spearman	0.131	3.53e-01	52
CO2 (ppm)	TVOC (ppm)	spearman	0.131	3.54e-01	52
CO2 (ppm)	H2S (ppm)	spearman	-0.00595	9.57e-01	84

Nota: Elaboración Propia

Se confirman dos hallazgos útiles: H₂S y TVOC se mueven en la misma dirección con fuerza, y CO y CO₂ muestran una subida conjunta moderada compatible con ventilación limitada o condiciones de mezcla; las demás combinaciones no evidencian relaciones consistentes, por lo que el seguimiento y control se concentra en estos dos pares.

4.3. Correlaciones significativas por grupo (punto-año, p<0.05)

La estratificación por punto-año permite ver patrones locales que pueden diluirse al analizar todo el conjunto; es útil para identificar condiciones específicas de ventilación o fuentes. Sin embargo, con n pequeño las correlaciones pueden ser inestables (valores muy altos por baja variación), por lo que se reportan como orientativas y se contrastan con análisis globales.

Tabla 7

Correlaciones significativas por grupo (todas las detectadas)

var1	var2	método	r	p_value	n	grupo
O2 (%)	TVOC (ppm)	pearson	-0.996	3.89e-03	4	P1-2023
H2S (ppm)	TVOC (ppm)	pearson	-0.990	9.67e-03	4	P1-2023
O2 (%)	H2S (ppm)	pearson	0.989	1.12e-02	4	P1-2023



var1	var2	método	r	p_value	n	grupo
CO2 (ppm)	TVOC (ppm)	pearson	-0.962	3.78e-02	4	P1-2023
CO (ppm)	TVOC (ppm)	pearson	1.000	3.19e-16	9	P1-2024
O2 (%)	CO (ppm)	pearson	1.000	9.06e-16	9	P1-2024
O2 (%)	TVOC (ppm)	pearson	1.000	6.49e-15	9	P1-2024
O2 (%)	CO2 (ppm)	pearson	0.998	4.95e-11	10	P1-2024
CO (ppm)	CO2 (ppm)	pearson	0.998	5.48e-10	9	P1-2024
CO2 (ppm)	TVOC (ppm)	pearson	0.998	1.08e-09	9	P1-2024
CO (ppm)	CO2 (ppm)	spearman	0.991	2.38e-07	9	P1-2024
CO (ppm)	H2S (ppm)	spearman	-0.703	3.47e-02	9	P1-2024
O2 (%)	CO (ppm)	pearson	1.000	0.000e+00	4	P2-2023
CO2 (ppm)	H2S (ppm)	pearson	-0.995	3.94e-04	5	P2-2023
O2 (%)	TVOC (ppm)	pearson	0.998	2.08e-03	4	P2-2023
CO (ppm)	TVOC (ppm)	pearson	0.998	2.08e-03	4	P2-2023
O2 (%)	CO (ppm)	pearson	1.000	8.64e-16	9	P2-2024
CO (ppm)	TVOC (ppm)	pearson	1.000	2.88e-15	9	P2-2024
O2 (%)	TVOC (ppm)	pearson	1.000	1.37e-14	9	P2-2024
O2 (%)	CO2 (ppm)	pearson	0.998	1.59e-10	10	P2-2024
CO (ppm)	CO2 (ppm)	pearson	0.998	1.80e-09	9	P2-2024
CO2 (ppm)	TVOC (ppm)	pearson	0.997	4.69e-09	9	P2-2024
CO (ppm)	CO2 (ppm)	spearman	0.945	1.18e-04	9	P2-2024
H2S (ppm)	TVOC (ppm)	spearman	-0.833	8.27e-03	9	P2-2024



var1	var2	método	r	p_value	n	grupo
CO2 (ppm)	H2S (ppm)	pearson	-0.922	2.57e-02	5	P3-2023
CO (ppm)	CO2 (ppm)	pearson	1.000	1.95e-27	9	P3-2024
O2 (%)	CO2 (ppm)	pearson	1.000	3.52e-17	10	P3-2024
O2 (%)	CO (ppm)	pearson	1.000	7.52e-16	9	P3-2024
CO (ppm)	TVOC (ppm)	pearson	1.000	1.93e-12	9	P3-2024
CO2 (ppm)	TVOC (ppm)	pearson	1.000	1.96e-12	9	P3-2024
O2 (%)	TVOC (ppm)	pearson	1.000	3.05e-12	9	P3-2024
CO2 (ppm)	H2S (ppm)	pearson	-0.922	2.57e-02	5	P4-2023
CO (ppm)	CO2 (ppm)	pearson	1.000	1.95e-27	9	P4-2024
O2 (%)	CO2 (ppm)	pearson	1.000	3.52e-17	10	P4-2024
O2 (%)	CO (ppm)	pearson	1.000	7.52e-16	9	P4-2024
CO (ppm)	TVOC (ppm)	pearson	1.000	1.93e-12	9	P4-2024
CO2 (ppm)	TVOC (ppm)	pearson	1.000	1.96e-12	9	P4-2024
O2 (%)	TVOC (ppm)	pearson	1.000	3.05e-12	9	P4-2024

Nota: Elaboración Propia

En grupos con pocos datos es esperable encontrar correlaciones muy altas por baja variación interna, por lo que estos resultados deben verse como antecedentes locales y no como patrones generales; cuando existe variación, se observa confluctuación de O₂, CO, CO₂ y TVOC más marcada en 2024 y un comportamiento de H₂S que puede diferir frente a CO₂ y TVOC, incluso en sentido contrario, lo cual respalda la revisión específica de rutas de aire y focos de emisión según punto y año.

5. Correlación inter-equipo (2025)



En 2025 se planificó estimar la asociación entre equipos por punto (cortes co-ubicados de 5, 10, 15 y 20 minutos) para O₂, CO y H₂S. No obstante, con los respaldos disponibles al momento de este informe no se cuenta con los cuatro pares apareados del equipo 1 en 2025 (requisito indispensable para cuantificar O₂ en P1–P4 y CO en P3–P4), y además en CO (P1–P2) y H₂S (P1–P4) el equipo 2 presenta varianza nula (0 ppm), condición que hace matemáticamente no interpretable cualquier coeficiente de correlación. En consecuencia, la correlación entre equipos se incorporará cuando se integren los pares crudos faltantes —y, para CO, previa conversión de unidades ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\leftrightarrow\text{ppm}$) declarando temperatura y presión del sitio—; entretanto, se documenta evidencia de sesgo en O₂ (p. ej., desplazamientos de hasta $\approx -1,0\%$ v/v en P1) y se adoptan criterios conservadores de seguridad en la toma de decisiones operativas. Dado el tamaño muestral por punto (n=4), cuando se completen los pares se reportarán Pearson y Spearman junto con análisis de acuerdo, que resultan más informativos para validar sustitución o combinación de equipos en series históricas.

6. Medidas preventivas y de control

Con base en los hallazgos, se priorizan:

- Ventilación: recalcular y aumentar caudales efectivos, optimizar direccionalidad (impulsión/retorno), sellar fugas y evitar recirculación; instrumentar balance de aire por circuito y frente.
- Gestión de fuentes: calendarizar mantenimiento preventivo de equipos diésel, controle de tiempos de marcha/ralentí, segregación temporal de tareas con alta carga móvil y rutas de tránsito que minimicen acumulación.
- Monitoreo en tiempo real: restablecer registro cada ~ 10 s con alarmas para O₂, CO y H₂S; mantener trazabilidad metrológica (calibración y verificación inter-equipo) y telemetría para respuesta rápida.
- Procedimientos y EPP: activar protocolos de emergencia (evacuación y ventilación de choque), briefings por turno y, cuando corresponda, protección respiratoria conforme a evaluación de riesgo.

- Seguimiento analítico: incorporar perfiles intrajornada (pendientes Δ/h), análisis por zona de retorno/impulsión y tableros operativos para decisiones en sitio.

Discusión

Los resultados muestran tasas elevadas de lecturas con oxígeno por debajo de 19,5 % v/v (70–75 %) en todas las combinaciones punto–año. Este punto es crítico: conforme al estándar de espacios confinados de OSHA, una atmósfera con $O_2 < 19,5$ % v/v se clasifica como deficiente en oxígeno, tratándose operativamente bajo criterios IDLH para control y selección de protección respiratoria; en tales condiciones se exige suministro confiable de aire respirable o uso de equipos de respiración adecuados (armonizado con la norma de protección respiratoria). En la práctica minera, los manuales de ventilación coinciden en que el objetivo primario es mantener una atmósfera respirable en todos los frentes mediante caudales y distribución que aseguren dilución de contaminantes y restablecimiento del O_2 . A la luz de lo anterior, la magnitud y persistencia de $O_2 < 19,5$ % observadas aquí son incompatibles con un control ventilatorio adecuado y justifican acciones correctivas inmediatas.

En el conjunto evaluado, el oxígeno (O_2) presenta medianas cercanas a 12,5 % v/v y una proporción elevada de lecturas por debajo de 19,5 % v/v (≈ 70 –75 %), lo que configura atmósferas no respirables; en el marco ecuatoriano aplican el Reglamento de Seguridad y Salud en el Trabajo (D.E. 255/2024), el Reglamento de SST en el Ámbito Minero (ARCERNNR-013/2020) y el Reglamento de Seguridad Minera (D.E. 3934), además de la Decisión Andina 584, que obligan a garantizar condiciones seguras aun cuando no exista un OEL numérico local para O_2 ; en la práctica, se adopta el umbral operativo OSHA para espacios confinados que clasifica como deficiente $O_2 < 19,5$ % v/v. En monóxido de carbono (CO), las medianas se ubican alrededor de 19,5–20,7 ppm y se observaron excedencias sobre 25 ppm exclusivamente en 2024 ($\approx 11,1$ %); en ausencia de límites nacionales específicos, el contraste se hace con ACGIH (TLV-TWA 25 ppm) y OSHA (PEL-TWA 50 ppm), por lo que esos picos, aunque por debajo del PEL, superan el criterio conservador de 25 ppm y ameritan medidas sobre ventilación y fuentes diésel. Para dióxido de carbono (CO_2), no se registran excedencias del TWA 5.000 ppm en el agregado, manteniéndose como referencia el STEL 30.000 ppm de uso habitual (ACGIH/OSHA) para valorar eventuales puntas intrajornada.



En sulfuro de hidrógeno (H_2S) no se identifican excedencias globales, pero su riesgo agudo exige vigilancia por los límites ACGIH (TWA 1 ppm; STEL 5 ppm), el techo OSHA de 20 ppm y el IDLH NIOSH de 100 ppm. Finalmente, los TVOC se emplean aquí como indicador de tendencia y de mezcla/retorno de aire, dado que no existe un OEL único para el total de orgánicos volátiles; la gestión se orienta por compuestos específicos (p. ej., benceno, tolueno) o por niveles de acción internos. En conjunto, el contraste normativo refuerza la prioridad operativa en tres frentes: restablecer O_2 a rango seguro mediante mejoras de ventilación, contener picos de CO mediante control de combustión y rutas de aire, y sostener telemetría con alarmas para anticipar condiciones potencialmente peligrosas.

Los hallazgos confirman la presencia de atmósferas peligrosas por deficiencia de oxígeno (70–75 % de lecturas por debajo de 19,5 % v/v). En monóxido de carbono (CO) se registra un patrón episódico con excedencias sobre 25 ppm únicamente en 2024 (11,1 %), compatible con emisiones de motores diésel y moduladas por la ventilación local; aun sin superar el PEL 50 ppm, tales picos ameritan auditoría de rutas de aire, ajuste de ciclos/ mantenimientos y ordenamiento del trabajo. Para dióxido de carbono (CO_2) no se observan excedencias sobre 5.000 ppm (TWA); no obstante, sin granularidad temporal no es posible descartar picos intrajornada frente a STEL 30.000 ppm. En sulfuro de hidrógeno (H_2S), la ausencia de excedencias agregadas no elimina el riesgo agudo, dada la baja TWA/STEL recomendada en higiene ocupacional; procede mantener vigilancia dedicada, verificación metrológica y alarmas conservadoras. Este conjunto de evidencias establece la existencia de gases peligrosos y condiciones de atmósfera no respirable que requieren acciones correctivas inmediatas y control continuo.

La cadencia alta de medición (\approx cada 10 s, con cortes de 5–20 min) es una barrera crítica de seguridad en labores subterráneas: caídas súbitas de O_2 por cambios de caudal, encendido de equipos o intrusión de gases pueden materializarse en decenas de segundos. La telemetría en tiempo real y alarmas permiten detectar y actuar (evacuación, ajuste de ventilación, bloqueo de fuentes) antes de comprometer la capacidad de escape; esta práctica se alinea con los principios de los estándares de espacios confinados y protección respiratoria. Por tanto, restaurar/asegurar la granularidad temporal no es un lujo metodológico sino un requisito preventivo para gestionar atmósferas potencialmente IDLH.

Con Pearson emergen asociaciones muy altas entre O_2 , CO, CO_2 y TVOC ($r \approx 0,996$ –1,000), un patrón típico de colinealidad cuando hay baja variabilidad intragrupo y estructura temporal no

capturada, que puede inflar la magnitud lineal y exige prudencia interpretativa. Con Spearman, al basarse en rangos, el panorama resulta más verosímil operativamente: destaca H₂S–TVOC (ρ alto y significativo) y CO–CO₂ (ρ moderado), coherentes con co-acumulación de productos de combustión y con la sensibilidad diferencial de H₂S a microambientes/procesos. En términos de ingeniería de ventilación, ello justifica modelos con componente temporal y espacial (perfiles intrajornada, análisis por retorno/impulsión y mapas de flujo) para fundamentar inferencias causales y no sólo correlaciones.

Finalmente, en lo instrumental, la plataforma multicanal empleada (O₂, CO, CO₂, H₂S y TVOC) es idónea para campañas de aire minero y soporta registro de alta resolución; sin embargo, la ausencia de cortes en la base analizada fue el principal limitante para estimar pendientes (Δ/h) y trazar perfiles intrajornada. A la luz de los resultados y del marco normativo señalado, las prioridades operativas son: (i) intervenir la ventilación hasta restablecer O₂ en rango seguro y minimizar picos de CO; (ii) implementar/recuperar medición rápida con telemetría y alarmas y trazabilidad metrológica, incluyendo verificación inter-equipos; y (iii) profundizar el análisis temporal-espacial en futuras campañas, conforme a las obligaciones de SST del Reglamento ecuatoriano y las buenas prácticas internacionales.

Conclusiones

La evidencia confirma la existencia de atmósferas peligrosas por deficiencia de oxígeno (70–75 % de lecturas <19,5 % v/v) y la presencia episódica de CO con picos >25 ppm (11,1 % en 2024). Estos hallazgos son consistentes con fuentes de combustión diésel, patrones de ventilación local insuficiente y posibles zonas de recirculación. Operativamente, se trata de condiciones con potencial IDLH que incrementan el riesgo de hipoxia, intoxicación por CO y accidentes por deterioro del desempeño psicomotor; su mitigación requiere intervención inmediata sobre el sistema de ventilación y la gestión de fuentes.

Se registraron y analizaron O₂, CO, CO₂, H₂S y TVOC en los cuatro puntos y tres años, con asociaciones estadísticas que refuerzan la interpretación operativa: CO–CO₂ mostró relación monótona moderada y H₂S–TVOC una covariación alta por rangos. Aunque CO₂ permaneció dentro de TWA y H₂S no evidenció excedencias agregadas, su co-fluctuación y toxicidad aguda justifican vigilancia sostenida y calibraciones frecuentes para evitar subdetección o retrasos en la alarma.



El conjunto monitoreado no cumple con el requerimiento mínimo de $O_2 \geq 19,5 \%$ v/v (referente internacional y práctica adoptada en el encuadre nacional), por lo que no garantiza atmósfera respirable en todos los frentes. Para CO, si bien no se superó el PEL-TWA de 50 ppm, la excedencia de 25 ppm (TLV-TWA) en 2024 obliga a acciones correctivas y auditorías. CO₂ se mantuvo ≤ 5.000 ppm (TWA), aunque la falta de granularidad temporal impide descartar picos intrajornada frente al STEL 30.000 ppm. Para H₂S, aun sin excedencias agregadas, los umbrales bajos (TWA 1 ppm; STEL 5 ppm) imponen un enfoque conservador.

Se propone un paquete integrado que prioriza: (i) ventilación con recalcu de caudales, optimización impulsión/retorno, sellos y balance de aire por circuito y frente; (ii) gestión de fuentes diésel mediante mantenimiento preventivo, control de marcha/ralentí, segregación temporal de tareas y rutas que minimicen acumulación; (iii) monitoreo en tiempo real con registro ~ 10 s, alarmas para O₂-CO-H₂S, trazabilidad metrológica y telemetría; y (iv) procedimientos/EPP con protocolos de emergencia y protección respiratoria según riesgo. Complementariamente, se incorporarán perfiles intrajornada (Δ/h), análisis por retorno/impulsión y tableros operativos para la toma de decisiones en sitio.

Referencias Bibliográficas

1. Al-Sobhi, S. A. (2023). *Monitoring of physiological and atmospheric parameters of people working in mining sites using a smart shirt: A review of latest technologies and limitations*. En Book Chapter (pp. 721-735).
2. Archana, T., Kalaivani, C., & Nachammai, C. (2024). Analysis of multi-parameter in underground mines for miners safety monitoring system based on wireless sensor technology. *Nucleation and Atmospheric Aerosols*.
3. Asavin, A. M., Gaskov, A. M., Gashimzade, F. M., & Kuchma, A. E. (2020). Miniature hydrogen sensors based on WSN for gas detection in mines. *Journal of Hazardous Materials*, 392, 122310. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122310>
4. Banu, G., Bensam, S. D., Priyadharshini, D., & Velmurugan, D. (2024). LoRa Tunnel Worker Wellness Management System. *Journal Article*, 126-131.
5. Dong, X. (2023). Adaptive gas concentration prediction based on empirical mode decomposition and Gaussian process regression. *Measurement*, 213, 112625. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.112625>



6. Duarte, J., Rodrigues, F., & Branco, J. C. (2022). Sensing technology applications in the mining industry— A systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(4), 2334. <https://doi.org/10.3390/ijerph19042334>
7. Flett, A. S. (2022). A mobile robot-based system for automatic inspection of belt conveyors in mining industry. *Energies*, 15(1), 327. <https://doi.org/10.3390/en15010327>
8. Gaiceanu, M., Buhosu, R., Solea, R., Silviu, E., Stankiewicz, K., & Skora, M. (2022). Underground mine monitoring system. *Proceedings Article*, 715–720.
9. Gorbounov, Y., Dinchev, Z., & Chen, H. (2022). Hazardous gas evaluation in the atmosphere of an open pit mine using wireless technology. *Telecom*, 1–4.
10. Huang, H., Li, J., & Wang, S. (2023). Spark streaming-based early warning system for toxic gas detection in coal mines using PSO-GRU optimization. *Computers & Electrical Engineering*, 105, 108588. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2023.108588>
11. Kalsi, H. S. (2022). To monitor real-time temperature and gas in an underground mine wireless on an Android mobile. *The Scientific Temper*, 13(2), 14–18.
12. Koponen, H., Lukkarinen, K., Leppänen, M., Kilpeläinen, L., Väättäinen, S., Jussheikki, P., Karjalainen, A., Ruokolainen, J., Yli-Pirilä, P., Ihalainen, M., Hyttinen, M., Pasanen, P., & Sippula, O. (2024). Applicability of aethalometers for monitoring diesel particulate matter concentrations and exposure in underground mines. *Journal of Aerosol Science*, 180, 106078. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2024.106078>
13. Kumar, P., & Paul, P. S. (2023). Development of LoRa communication system for effective transmission of data from underground coal mines. *Processes*, 11(6), 1691. <https://doi.org/10.3390/pr11061691>
14. Liu, Z. (2023). Development of low-cost intelligent alert system for underground coal mines using GSM. *Book Chapter*, 313–323.
15. Muralidhara, P., & Hegde, R. (2020). Wireless sensor and actuator networks for real-time mine safety monitoring. *IEEE Access*, 8, 20426–20434. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2969047>
16. Prasad, R. (2024). Artificial neural networks integrated with Pd-doped SnO₂ thick film gas sensors for hazardous gas detection in mines. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 416, 133523. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2024.133523>
17. Porselvi, T., Ganesh, S., Janaki, B., Priyadarshini, K., & Begam, S. S. (2021). IoT based coal mine safety and health monitoring system using LoRaWAN. *Proceedings Article*.
18. Sharma, A., Rajawat, A. S., & Gupta, D. (2022). IoT-enabled cloud-based gas leakage detection and alerting system for underground mines. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 13(2), 1231–1244. <https://doi.org/10.1007/s12652-021-03127-3>



19. Shaheryar, M., Sajjad, Nazeer, H., Waseem, H., Shakoor, R. I., & Osama, M. A. (2023). Monitoring and surveillance system using PLC for mining industry. *Proceedings Article*, 1–5.
20. Siddiqui, A. H., Ranade, A., Meshram, A., & Waiker, V. (2024). Remote monitoring of hazardous environment at mining sites using LoRa network. *Proceedings Article*, 1–5.
21. Sidorenko, S., Trushnikov, V., & Sidorenko, A. (2024). Methane emission estimation tools as a basis for sustainable underground mining of gas-bearing coal seams. *Sustainability*, 16(3), 1214. <https://doi.org/10.3390/su16031214>
22. Stoicuta, O., Riurean, S., Burian, S., Leba, M., & Ionica, A. (2023). Application of optical communication for an enhanced health and safety system in underground mine. *Sensors*, 23(2), 692. <https://doi.org/10.3390/s23020692>
23. Thirunavukkarasu, M., Priyanka, E. B., Thangavel, S., Vinothkannan, S., Prasath, K. A., Aathif, N. A., & Narayanan, R. G. (2023). SHELLCOM-IoT-based health monitoring module for mining industry. *Book Chapter*, 41–49.
24. Triola, M. F. (2018). *Estadística* (12.^a ed.). Pearson. (véase capítulo de correlación y regresión).
25. Tu, Y., & Chen, Y. (2021). A survey on signal interference and environmental challenges in underground mine wireless networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(12), 8796–8806. <https://doi.org/10.1109/TII.2021.3089175>
26. Ziętek, S., Mroczka, J., & Kuta, D. (2020). Low-cost portable gas detection system for underground mine safety using smartphones. *Measurement*, 159, 107750. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107750>

Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existe conflicto de interés posible.

Financiamiento:

No existió asistencia financiera de partes externas al presente artículo.

Agradecimiento:

N/A

Nota:

El artículo no es producto de una publicación anterior.