

Complicaciones de los gases tóxicos en el desarrollo de la higiene industrial desde la perspectiva técnica de la salud y seguridad ocupacional.

Complications of toxic gases in the development of industrial hygiene from the technical perspective of occupational health and safety.

Complicações dos gases tóxicos no desenvolvimento da higiene industrial sob a perspectiva técnica da saúde e segurança ocupacional.

Steeven Eduardo Carpio Candelario
Universidad Casa Grande
Ecuador
steveen.carpio@casagrande.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0007-4036-3331>

José Luis Saá Loor
Universidad Católica Santiago de Guayaquil
Ecuador
jose.saa@cuucsg.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-2654-1935>

Jonathan Josue Ramirez Davalos
Instituto Superior Tecnológico Juan Bautista Aguirre
Ecuador
jonathanramirezdv@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-1042-1282>

Wilmer Romeo Albán Holguín
Sominur CLTDA.
Ecuador
w.alban@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-1078-0333>

Forma de citación en APA, séptima edición.

Carpio, S; Saá, J; Ramirez, J; Albán, W.(2026). *Complicaciones de los gases tóxicos en el desarrollo de la higiene industrial desde la perspectiva técnica de la salud y seguridad ocupacional*. Revista Ibero Research, 1(7), 529 - 577.

Fecha de presentación: 20/08/2026

Fecha de aceptación: 03/09/2026

Fecha de publicación: 04/09/2026

Resumen

La exposición ocupacional a gases tóxicos representa un problema prioritario de higiene industrial por su capacidad de producir lesiones agudas, secuelas crónicas, incapacidad y muerte, especialmente cuando existen procesos de combustión, tratamiento de aguas, minería, refrigeración, desinfección, soldadura o trabajo en espacios confinados. El objetivo fue analizar las complicaciones asociadas con monóxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, cloro, amoníaco, dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno, integrando criterios técnicos de evaluación y control. Se desarrolló una revisión narrativa integrativa con actualización bibliográfica en PubMed/MEDLINE y fuentes oficiales de OIT, OMS, NIOSH, OSHA e ISO, priorizando evidencia de 2021-2026 y documentos normativos vigentes. Los resultados mostraron perfiles toxicológicos diferenciados, valores IDLH entre 10 y 1200 ppm, afectación respiratoria común a los seis gases y necesidad de combinar medición ambiental, límites ocupacionales, vigilancia de salud y controles en la fuente. Se concluyó que la prevención efectiva depende de anticipación, reconocimiento, evaluación cuantitativa y control, con prioridad para eliminación, sustitución e ingeniería antes del uso de protección personal.

Palabras clave: exposición química; vigilancia ambiental; toxicología ocupacional; control de riesgos; atmósferas peligrosas.

Abstract

Occupational exposure to toxic gases is a priority industrial hygiene problem because it can cause acute injury, chronic sequelae, disability, and death, particularly in combustion processes, wastewater treatment, mining, refrigeration, disinfection, welding, and confined-space work. The objective was to analyze complications associated with carbon monoxide, hydrogen sulfide, chlorine, ammonia, sulfur dioxide, and nitrogen dioxide while integrating technical criteria for exposure assessment and control. An integrative narrative review was conducted with an updated search in PubMed/MEDLINE and official sources from ILO, WHO, NIOSH, OSHA, and ISO, prioritizing evidence from 2021-2026 and current regulatory documents. Results showed differentiated toxicological profiles, NIOSH IDLH values ranging from 10 to 1200 ppm, respiratory involvement common to all six gases, and the need to combine environmental measurement, occupational limits, health surveillance, and source controls. It was concluded that effective prevention depends on anticipation, recognition, quantitative evaluation, and control, prioritizing elimination, substitution, and engineering measures before reliance on personal protective equipment.

Keywords: chemical exposure; environmental monitoring; occupational toxicology; risk control; hazardous atmospheres.

Resumo

A exposição ocupacional a gases tóxicos constitui um problema prioritário da higiene industrial pela capacidade de causar lesões agudas, sequelas crônicas, incapacidade e morte, sobretudo em processos de combustão, tratamento de águas, mineração, refrigeração, desinfecção, soldagem e trabalhos em espaços confinados. O objetivo foi analisar as complicações associadas ao monóxido de carbono, sulfeto de hidrogênio, cloro, amônia, dióxido de enxofre e dióxido de nitrogênio, integrando critérios técnicos de avaliação e controle. Desenvolveu-se uma revisão narrativa integrativa com atualização bibliográfica no PubMed/MEDLINE e em fontes oficiais da OIT, OMS, NIOSH, OSHA e ISO, priorizando evidências de 2021-2026 e documentos normativos vigentes. Os resultados evidenciaram perfis toxicológicos distintos, valores IDLH entre 10 e 1200 ppm, comprometimento respiratório comum aos seis gases e necessidade de articular medição ambiental, limites ocupacionais, vigilância da saúde e controles na fonte. Concluiu-se que a prevenção efetiva depende de antecipação, reconhecimento, avaliação quantitativa e controle, priorizando eliminação, substituição e engenharia antes da proteção individual.

Palavras-chave: exposição química; monitoramento ambiental; toxicologia ocupacional; controle de riscos; atmosferas perigosas.

Introducción

La utilización de sustancias químicas y la generación de contaminantes gaseosos forman parte de numerosos procesos productivos contemporáneos, por lo que la exposición laboral a agentes químicos continúa constituyendo una amenaza relevante para la salud de la población trabajadora. La Organización Internacional del Trabajo ha descrito una carga mundial importante asociada con exposiciones químicas ocupacionales, que comprende intoxicaciones, enfermedades respiratorias y cardiovasculares, cáncer, discapacidad y muertes evitables, mientras que la Organización Mundial de la Salud mantiene la exposición a productos químicos peligrosos entre los riesgos ocupacionales que requieren prevención sistemática. Esta problemática se vuelve especialmente visible en industrias con fuentes continuas o accidentales de gases, vapores y productos de combustión (1,2).

La magnitud del riesgo no se distribuye de forma homogénea entre actividades económicas, debido a que minería, petróleo y gas, manufactura, agricultura, tratamiento de aguas, construcción, refrigeración industrial, soldadura, laboratorios, mantenimiento y servicios sanitarios presentan condiciones diferentes de generación, confinamiento y ventilación. La OIT ha señalado que la exposición química en minería permanece como un problema de seguridad y salud a escala internacional, con vulnerabilidad particular en contextos de pequeña minería e informalidad, lo que refuerza la necesidad de sistemas de prevención capaces de actuar antes de la aparición de intoxicaciones o enfermedades profesionales (3).

La higiene industrial ofrece el marco técnico para abordar esa complejidad mediante la anticipación, el reconocimiento, la evaluación y el control de los factores ambientales originados en el trabajo. Esta secuencia transforma la prevención en un proceso basado en evidencia, en el que la identificación del contaminante se relaciona con su fuente, la

ruta de exposición, la concentración, la duración, la frecuencia y las características del puesto, en lugar de depender solamente de la percepción sensorial o de la conducta individual. OSHA vincula este enfoque con el reconocimiento de peligros químicos, la comunicación del riesgo y el establecimiento de medidas correctivas verificables (4).

La jerarquía de controles constituye uno de los principios centrales para decidir la respuesta preventiva, porque ordena las intervenciones según su capacidad para reducir la exposición sin depender de manera predominante del comportamiento humano. NIOSH sitúa la eliminación y la sustitución en los niveles de mayor efectividad, seguidas por los controles de ingeniería, los controles administrativos y el equipo de protección personal, mientras que OSHA sostiene que la ingeniería y las prácticas de trabajo deben ser los medios primarios siempre que sean factibles. Esta lógica favorece el diseño seguro del proceso y disminuye la probabilidad de que una falla individual se convierta en una exposición peligrosa (5,6).

La gestión preventiva también exige un sistema organizacional capaz de integrar peligros, controles, vigilancia, participación de los trabajadores, preparación para emergencias e investigación de incidentes. ISO 45001:2018, confirmada como versión vigente durante 2024, establece un marco de gestión que articula identificación de peligros, evaluación de riesgos, requisitos legales, objetivos, control operacional y mejora continua, elementos particularmente pertinentes cuando se manejan agentes gaseosos capaces de producir eventos súbitos y consecuencias graves. De este modo, la higiene industrial deja de ser una actividad aislada de medición y se convierte en un componente estratégico del sistema de seguridad y salud en el trabajo (7).

Los gases tóxicos presentan dificultades preventivas específicas por sus propiedades fisicoquímicas, ya que pueden difundirse con rapidez, desplazarse desde la fuente, acumularse en zonas bajas o espacios cerrados, reaccionar con otras sustancias y

alcanzar concentraciones críticas en periodos breves. La NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards reúne información de límites de exposición, valores inmediatamente peligrosos para la vida o la salud, métodos de medición, síntomas, órganos diana y recomendaciones respiratorias, por lo que constituye una referencia técnica útil para conectar la toxicología con la práctica de higiene ocupacional. Su utilización, sin embargo, requiere interpretar cada valor en función de su base temporal y del escenario real de exposición (8).

El monóxido de carbono representa un ejemplo clásico de riesgo difícil de reconocer mediante los sentidos, debido a que es un gas incoloro e inodoro producido por combustión incompleta. NIOSH establece para este agente un valor IDLH de 1200 ppm, un límite recomendado TWA de 35 ppm y un ceiling de 200 ppm, mientras que OSHA mantiene un PEL TWA de 50 ppm. Su toxicidad se relaciona con la formación de carboxihemoglobina y con alteraciones de la utilización celular del oxígeno, por lo que cefalea, mareo, debilidad, confusión, pérdida de conciencia, compromiso cardiovascular y daño neurológico pueden presentarse en exposiciones relevantes (9).

El sulfuro de hidrógeno posee una problemática diferente, aunque comparte el potencial de producir hipoxia celular y colapso rápido. Puede generarse en alcantarillado, plantas de tratamiento, industria petrolera, minería y descomposición de materia orgánica, con un valor IDLH de 100 ppm y un límite NIOSH de 10 ppm como techo de diez minutos. El olor característico no constituye un método de protección, porque la percepción olfativa puede fatigarse rápidamente, condición que transforma la confianza en el olfato en un factor de riesgo adicional y obliga a utilizar detección instrumental antes y durante las tareas susceptibles de liberar H_2S (10).

El cloro y el amoníaco corresponden a gases irritantes de amplia utilización industrial, cuyos efectos dependen en gran medida de su reactividad y solubilidad. El cloro

presenta un valor IDLH de 10 ppm, puede producir quemadura ocular y respiratoria, broncoespasmo, neumonitis y edema pulmonar, mientras que el amoníaco presenta un IDLH de 300 ppm y se asocia con irritación intensa de mucosas, disnea, sibilancias, dolor torácico, edema pulmonar y quemaduras cuando existe contacto con soluciones o producto licuado. La diversidad de procesos en los que se emplean obliga a combinar almacenamiento seguro, segregación de incompatibles, ventilación, detección y planificación de emergencias (11,12).

El dióxido de azufre y el dióxido de nitrógeno son contaminantes gaseosos vinculados con combustión y determinados procesos térmicos o químicos. NIOSH establece para SO₂ un IDLH de 100 ppm, REL TWA de 2 ppm y STEL de 5 ppm, mientras que para NO₂ establece un IDLH de 13 ppm y un REL de corta duración de 1 ppm. Ambos presentan una marcada relevancia respiratoria, aunque NO₂ también se relaciona con compromiso cardiovascular en la ficha de NIOSH, lo que demuestra que la prevención no debe reducirse a una clasificación general de irritantes, sino considerar el perfil toxicológico particular de cada sustancia (13,14).

La protección respiratoria es necesaria cuando el peligro no puede controlarse completamente mediante medidas superiores de la jerarquía, pero su eficacia depende de selección, ajuste, mantenimiento, capacitación y condiciones atmosféricas conocidas. OSHA establece que la finalidad primaria debe ser prevenir la contaminación atmosférica mediante controles de ingeniería y que, cuando se requieren respiradores, debe existir un programa escrito con evaluación del riesgo, selección adecuada, evaluación médica, pruebas de ajuste y entrenamiento. En atmósferas IDLH se requieren equipos de suministro de aire apropiados, lo que excluye la idea de que cualquier respirador convencional sea suficiente frente a una fuga grave de gas (15).

Los espacios confinados amplifican el peligro debido a que pueden combinar deficiencia de oxígeno, gases tóxicos y atmósferas inflamables, además de limitar la salida y complicar el rescate. OSHA exige procedimientos específicos para espacios que requieren permiso, con evaluación atmosférica y condiciones aceptables de entrada, mientras que la práctica higiénica demanda medir antes del ingreso y continuar la vigilancia cuando la atmósfera puede cambiar. Esta exigencia adquiere importancia en tanques, pozos, alcantarillas, silos, cámaras, reactores y sistemas de tratamiento donde la exposición puede pasar de tolerable a letal en poco tiempo (16).

La evaluación cuantitativa necesita métodos de muestreo y análisis capaces de producir resultados comparables con criterios ocupacionales. El NIOSH Manual of Analytical Methods reúne métodos validados para aire de trabajo y otras matrices, además de lineamientos sobre selección de protocolos, precisión, incertidumbre y aseguramiento de la calidad. La disponibilidad de un método listado no elimina la necesidad de definir una estrategia de muestreo representativa, porque las concentraciones cambian según tarea, ciclo productivo, ventilación, temperatura, mantenimiento y eventos transitorios, de modo que una única medición puede subestimar picos críticos (17).

La evidencia clínica reciente confirma que el monóxido de carbono continúa siendo una causa relevante de intoxicación y que sus consecuencias exceden la hipoxemia inmediata. Revisiones publicadas en 2024 describen alteraciones neurológicas y cardiovasculares, dificultad para reconocer exposiciones prolongadas de baja intensidad y persistencia de déficits en una parte de los sobrevivientes, mientras que el análisis terapéutico contemporáneo incorpora mecanismos mitocondriales y estrategias destinadas a acelerar la eliminación del gas. Estos hallazgos fortalecen el vínculo entre vigilancia ocupacional y atención clínica temprana, porque el diagnóstico tardío puede incrementar la posibilidad de secuelas (18,19).

La revisión clínica de Weaver mantiene la relevancia de la oxigenoterapia y de la valoración especializada en intoxicaciones por CO, al tiempo que muestra la necesidad de interpretar exposición, síntomas, comorbilidades y evolución de manera conjunta. Desde la prevención ocupacional, este conocimiento tiene una implicación directa: la vigilancia ambiental debe activarse antes de que aparezcan manifestaciones clínicas y los programas de emergencia deben contemplar evaluación rápida, retirada de la fuente, soporte respiratorio y derivación sanitaria según la gravedad, sin utilizar la ausencia de síntomas iniciales como criterio suficiente para descartar riesgo (20).

En relación con el sulfuro de hidrógeno, la evidencia reciente diferencia con mayor claridad los efectos de exposiciones agudas intensas y los problemas asociados con exposiciones de menor nivel. Batterman y colaboradores documentaron que los resultados epidemiológicos a bajas concentraciones presentan limitaciones metodológicas, aunque se han descrito síntomas oculares, nasales, respiratorios y neurológicos, lo que impide asumir que solo las exposiciones cercanas a valores de emergencia tienen relevancia sanitaria. Esta observación favorece políticas de prevención que consideren tanto picos como exposición acumulada, especialmente en actividades con liberaciones intermitentes o comunidades laborales cercanas a fuentes (21).

Las intoxicaciones agudas por H₂S mantienen además una preocupación por su rapidez de acción y por la ausencia de un antídoto aprobado de uso general. Revisiones toxicológicas han descrito afectación de los sistemas neurológico, respiratorio y cardiovascular, necesidad de soporte inmediato y controversias sobre algunos tratamientos, mientras que trabajos mecanísticos señalan inhibición mitocondrial y múltiples efectos sobre órganos diana. La literatura más reciente también ha retomado las secuelas neurológicas en sobrevivientes, entre ellas alteraciones cognitivas, motoras

y neuropsiquiátricas, lo que justifica seguimiento clínico posterior a exposiciones graves (22-24).

Para el cloro, una revisión paraguas de datos humanos identificó que la retirada de la exposición y el soporte respiratorio constituyen componentes centrales del manejo, aunque la certeza de la evidencia para tratamientos específicos es variable. Un análisis de exposiciones notificadas a centros toxicológicos estadounidenses mostró que los episodios por cloro y cloraminas continuaron siendo frecuentes durante 2015-2022, con incremento alrededor del periodo pandémico, lo que evidencia que la generación accidental de gases por mezcla de productos sigue siendo un problema vigente. En ambientes laborales, la prevención exige por ello compatibilidad química, etiquetado, formación y control de procedimientos de limpieza y desinfección (25,26).

La literatura sobre amoníaco refuerza la necesidad de detección ambiental y de tecnologías capaces de operar en condiciones reales de trabajo. Una revisión de 2024 sobre narices electrónicas destacó que la exposición crónica o repetida puede relacionarse con irritación ocular, cutánea y respiratoria, mientras que los episodios intensos pueden provocar disnea, cianosis y edema pulmonar. La dificultad para disponer de sensores selectivos, estables y accesibles sigue siendo un reto tecnológico, de manera que la instrumentación debe seleccionarse por desempeño validado y mantenerse dentro de programas de calibración y verificación funcional (27).

En el caso del dióxido de azufre, una revisión toxicológica de 2026 reunió evidencia sobre mecanismos irritativos, inflamatorios y sistémicos, mientras que un metaanálisis de 2024 evaluó la asociación entre exposición ambiental de corto plazo y ocurrencia de enfermedad pulmonar obstructiva crónica. Aunque la extrapolación directa desde contaminación ambiental hacia exposición ocupacional requiere cautela, estas investigaciones respaldan la plausibilidad de efectos respiratorios y la necesidad de

evitar interpretar los límites laborales como fronteras absolutas entre seguridad y daño, especialmente en trabajadores susceptibles o expuestos simultáneamente a otros contaminantes (28,29).

Para dióxido de nitrógeno, una actualización sistemática y metaanálisis que amplió la evidencia utilizada por las guías de calidad del aire de la OMS halló asociaciones entre exposición de largo plazo y diferentes desenlaces de mortalidad, con certeza variable según desenlace. El contexto ambiental y el ocupacional no son equivalentes, pero ambos demuestran que la exposición respiratoria a NO₂ tiene importancia sanitaria y que los controles deben diseñarse con perspectiva preventiva, evitando que un cumplimiento puntual de un límite o una medición aislada sustituya el análisis integral de la exposición (30).

La evolución tecnológica ofrece oportunidades para fortalecer esta vigilancia. Revisiones recientes describen nanosensores aplicables a minería, sistemas químicos con procesamiento mediante aprendizaje automático, sensores térmicos micromecanizados, plataformas microfluídicas miniaturizadas, dispositivos semiconductores de nueva generación y sensores inteligentes integrados con comunicaciones e Internet de las cosas. Estas tecnologías pueden mejorar sensibilidad, portabilidad, respuesta y capacidad de alerta, aunque persisten retos de selectividad, deriva, interferencias, estabilidad y validación, por lo que su incorporación debe acompañarse de criterios metrológicos y de higiene industrial, no reemplazarlos (31-36).

En Ecuador, la coexistencia de actividades mineras, industriales, de construcción, tratamiento de aguas, agricultura, manufactura y servicios implica escenarios en los que la exposición a gases tóxicos puede presentarse de manera rutinaria o accidental. La relevancia local se relaciona menos con la existencia de un único contaminante y más

con la necesidad de disponer de procedimientos capaces de identificar qué gas puede generarse, en qué tarea, bajo qué condiciones y con qué rapidez puede alcanzar niveles peligrosos. La prevención requiere integrar información de procesos, fichas de datos de seguridad, medición, mantenimiento, vigilancia médica y preparación para emergencias, ajustando criterios internacionales al marco normativo aplicable y a las características reales del puesto.

El vacío de conocimiento abordado por esta revisión se ubica en la necesidad de integrar, dentro de un mismo análisis, las complicaciones clínicas de gases prioritarios con los parámetros operativos utilizados por la higiene industrial para prevenirlas. La información toxicológica aislada permite reconocer daño, mientras que los límites de exposición sin interpretación clínica pueden conducir a una lectura incompleta del riesgo; por ello, resulta necesario relacionar síntomas, órganos diana, valores IDLH, límites ocupacionales, métodos analíticos, monitoreo, controles de ingeniería, protección respiratoria y respuesta en espacios confinados dentro de una estructura coherente de salud y seguridad ocupacional.

El objetivo general consistió en analizar las complicaciones de los gases tóxicos en el desarrollo de la higiene industrial desde la perspectiva técnica de la salud y seguridad ocupacional. Como objetivos específicos se planteó caracterizar los principales gases de importancia laboral y sus efectos sobre órganos y sistemas, comparar criterios técnicos de exposición y medición disponibles para CO, H₂S, Cl₂, NH₃, SO₂ y NO₂, examinar la utilidad del monitoreo ambiental y de las tecnologías de detección, y establecer cómo la jerarquía de controles, la vigilancia de la salud y la preparación ante emergencias pueden reducir el riesgo.

Metodología

Se desarrolló una revisión narrativa de carácter integrativo orientada a sintetizar evidencia toxicológica, clínica, higiénica y preventiva sobre exposición ocupacional a gases tóxicos, tomando como base el documento de investigación proporcionado y realizando una actualización bibliográfica externa hasta el 4 de septiembre de 2026. El diseño se seleccionó porque el problema reúne fuentes heterogéneas, entre ellas revisiones clínicas, estudios epidemiológicos, normas técnicas, límites ocupacionales, métodos de muestreo y documentos de organismos especializados, cuya integración cualitativa permite analizar la relación entre daño a la salud, medición de la exposición y control preventivo sin atribuir efectos combinados que no hayan sido estimados formalmente.

La búsqueda científica se efectuó en PubMed/MEDLINE para localizar revisiones, metaanálisis y estudios recientes relacionados con monóxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, cloro, amoníaco, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, intoxicación, exposición ocupacional, secuelas, vigilancia y detección. De forma complementaria se consultaron repositorios y páginas oficiales de la Organización Internacional del Trabajo, Organización Mundial de la Salud, National Institute for Occupational Safety and Health, Occupational Safety and Health Administration e International Organization for Standardization, priorizando documentos con aplicación directa a higiene industrial, control de sustancias químicas, espacios confinados, protección respiratoria y sistemas de gestión (1-17).

Se utilizaron términos en español e inglés y combinaciones equivalentes a los descriptores occupational exposure, industrial hygiene, toxic gases, carbon monoxide, hydrogen sulfide, chlorine, ammonia, sulfur dioxide, nitrogen dioxide, gas detection, confined spaces, respiratory protection y hierarchy of controls. Las expresiones se articularon con operadores AND y OR según la pregunta específica, de modo que las

búsquedas clínicas vincularon cada gas con poisoning, toxicity, health effects o sequelae, mientras que las búsquedas preventivas relacionaron los agentes con exposure limits, monitoring, sampling, engineering controls, sensors y occupational safety. No se aplicó un operador NOT de manera sistemática para evitar excluir literatura multidisciplinaria relevante.

El intervalo temporal prioritario comprendió 2021-2026, conforme con el propósito de actualizar el documento base y privilegiar evidencia reciente. Se admitieron fuentes anteriores cuando correspondieron a referencias normativas vigentes, métodos analíticos, revisiones toxicológicas fundamentales o documentos que continúan siendo utilizados por organismos de salud y seguridad ocupacional. Este criterio permitió mantener la referencia de 2019 sobre mecanismos del H₂S y documentos regulatorios anteriores que continúan vigentes, sin desplazar la actualización principal sustentada en revisiones y publicaciones de los últimos cinco años (18-36).

Se incluyeron documentos con identificación bibliográfica verificable, pertinencia directa para exposición a gases, descripción de efectos en salud, límites de exposición o métodos de evaluación, así como publicaciones sobre tecnologías de detección con posible aplicación a seguridad ocupacional. Se excluyeron contenidos comerciales sin respaldo técnico, fuentes sin autoría institucional o trazabilidad, publicaciones centradas exclusivamente en aplicaciones terapéuticas del gas a concentraciones fisiológicas sin relación con toxicidad, documentos duplicados y estudios cuya información no permitía establecer con claridad el agente, la población o el contexto de exposición. La selección se realizó por relevancia temática y calidad de la fuente, sin pretender exhaustividad propia de una revisión sistemática.

La unidad de análisis estuvo constituida por documentos científicos y técnicos, no por participantes individuales, por lo que no se estableció muestra probabilística ni tamaño

muestral clínico. Para cada fuente se extrajo información sobre agente, sector o proceso de generación, propiedades relevantes para la exposición, ruta principal, mecanismos de daño, manifestaciones agudas, posibles secuelas, órganos diana, criterios NIOSH REL, OSHA PEL, valores IDLH, métodos analíticos de referencia, controles de ingeniería, medidas administrativas, protección respiratoria, vigilancia médica y respuesta ante emergencias. La extracción se organizó en una matriz comparativa destinada a reducir inconsistencias entre la síntesis narrativa y los elementos cuantitativos presentados en resultados.

Los valores de exposición utilizados para las comparaciones cuantitativas se tomaron directamente de las fichas del NIOSH Pocket Guide para los seis gases seleccionados, porque estas fichas presentan conjuntamente REL de NIOSH, PEL de OSHA, IDLH, métodos de medición, síntomas y órganos diana (8-14). Se mantuvo la unidad ppm y la base temporal original de cada límite; por esta razón, los valores TWA, ST, ceiling y picos máximos no se interpretaron como equivalentes. En el gráfico comparativo de límites se utilizó únicamente el valor principal indicado para cada organismo con finalidad descriptiva, incluyendo una nota explícita sobre las diferencias de base temporal.

La clasificación de órganos y sistemas diana se realizó a partir de los campos Target Organs de NIOSH y se codificó en categorías comparables: respiratorio, ocular, cutáneo, cardiovascular, sistema nervioso central y sangre. Se contabilizó la presencia de cada categoría entre los seis agentes, sin asignar ponderaciones de gravedad ni inferir riesgo relativo. El monóxido de carbono se codificó con pulmones, sistema cardiovascular, sangre y sistema nervioso central; H₂S con ojos, sistema respiratorio y sistema nervioso central; cloro, amoníaco y SO₂ con ojos, piel y sistema respiratorio; NO₂ con ojos, sistema respiratorio y sistema cardiovascular (9-14).

La capacidad analítica se describió mediante el número de métodos NIOSH y OSHA listados en cada ficha, contabilizando cada código metodológico de forma independiente. Esta variable no se interpretó como indicador de superioridad de un método ni como medida de facilidad de monitoreo, sino como representación descriptiva de la disponibilidad de procedimientos de referencia mencionados por NIOSH para cada agente. La interpretación se complementó con el NMAM, que establece que la elección del protocolo debe considerar desempeño, exactitud, costo, número de muestras y adecuación a la situación específica de exposición (17).

La síntesis clínica priorizó revisiones contemporáneas sobre CO, H₂S, cloro, amoníaco, SO₂ y NO₂, contrastándolas con las manifestaciones resumidas en NIOSH. Para CO se consideraron revisiones clínicas y toxicológicas de 2024; para H₂S se integraron revisiones sobre baja exposición, tratamiento, mecanismos y secuelas neurológicas; para cloro se empleó una revisión paraguas y un estudio de tendencias de centros toxicológicos; para amoníaco se incorporó una revisión sobre detección y seguridad; para SO₂ y NO₂ se utilizaron revisiones y metaanálisis recientes que aportan contexto sobre daño respiratorio y cardiovascular (18-30).

La síntesis preventiva se estructuró con la jerarquía de controles como principio ordenador. La eliminación y sustitución se interpretaron como medidas de mayor nivel, seguidas por encapsulamiento, aislamiento, ventilación localizada, extracción, automatización, sensores y alarmas dentro de los controles de ingeniería; posteriormente se consideraron procedimientos, permisos, capacitación, señalización, mantenimiento, inspección y organización del trabajo. El equipo de protección personal se mantuvo como última barrera y la protección respiratoria se relacionó con evaluación atmosférica, selección por contaminante, ajuste y condiciones IDLH, conforme con los criterios de NIOSH y OSHA (5,6,15).

Los espacios confinados se analizaron como un escenario transversal porque pueden contener simultáneamente deficiencia de oxígeno, tóxicos e inflamables. Se integraron los requisitos de evaluación previa, condiciones aceptables de entrada, ventilación, aislamiento de fuentes, permiso, comunicación, vigilancia externa y capacidad de rescate, evitando considerar el rescate improvisado como respuesta válida. La lógica metodológica se orientó a identificar cómo la medición atmosférica y el control operacional pueden prevenir exposiciones secundarias de compañeros o rescatistas, aspecto coherente con el documento base y con el estándar OSHA para espacios que requieren permiso (16).

La vigilancia de la salud se trató como complemento de la higiene industrial y no como sustituto del control ambiental. Se integraron evaluación médica inicial, antecedentes de exposición, valoración respiratoria, función pulmonar, examen neurológico y cardiovascular, biomarcadores cuando existe validación para el agente, seguimiento periódico y registro epidemiológico. La interpretación evitó proponer protocolos clínicos específicos no respaldados por las fuentes, debido a que la pertinencia de cada prueba depende del gas, la intensidad y la duración de la exposición, las tareas realizadas y la normativa aplicable en cada jurisdicción.

Las tecnologías de sensores se examinaron por su potencial para mejorar detección temprana, monitoreo personal y alertas, considerando trabajos recientes sobre nanomateriales, aprendizaje automático, MEMS térmicos, microfluídica, semiconductores y sistemas inteligentes conectados (31-36). La integración no asumió que una tecnología experimental pueda sustituir detectores certificados, debido a que selectividad, interferencias, calibración, deriva, estabilidad y tiempo de respuesta determinan la utilidad real en seguridad ocupacional. Se valoró, por tanto, la innovación

desde una perspectiva de desempeño y validación metrológica, compatible con los principios de higiene industrial.

El análisis de datos fue descriptivo e integrativo. Los valores oficiales se organizaron en cuatro tablas y cuatro gráficos complementarios, sin realizar metaanálisis, estimaciones combinadas ni pruebas inferenciales, ya que las fuentes presentaron diseños, poblaciones, bases temporales y desenlaces heterogéneos. Los gráficos se construyeron a partir de datos oficiales de NIOSH y OSHA, conservando sus unidades y señalando las limitaciones de comparabilidad. La discusión se realizó mediante triangulación entre toxicología, evidencia clínica, criterios de exposición, capacidad de medición y jerarquía de controles, con énfasis en la aplicabilidad para salud y seguridad ocupacional.

No se requirió aprobación por un comité de ética ni consentimiento informado porque no se reclutaron personas, no se utilizaron historias clínicas identificables y no se generaron datos primarios de sujetos humanos. Se respetaron principios de integridad científica mediante uso exclusivo de fuentes verificables, conservación de los valores reportados por organismos oficiales, exclusión de estadísticas no confirmadas y cita correlativa en estilo Vancouver. Las limitaciones inherentes a una revisión narrativa, como la heterogeneidad de fuentes y la imposibilidad de estimar un efecto combinado, se consideraron al interpretar los hallazgos y se desarrollaron dentro de la discusión sin crear apartados adicionales.

Resultados

La integración de la evidencia permitió identificar un patrón común: los seis gases analizados pueden producir afectación respiratoria, pero difieren de manera importante en mecanismo de toxicidad, órganos diana, concentraciones de emergencia, base temporal de los límites ocupacionales y necesidades de medición. Esta heterogeneidad confirma que la categoría general de “gas tóxico” es insuficiente para diseñar controles específicos, pues la estrategia preventiva debe partir del agente, del proceso y de la posibilidad de liberación rutinaria o accidental. Los resultados se presentan mediante una secuencia intercalada de tablas y gráficos que relaciona perfil toxicológico, criterios cuantitativos, órganos afectados y herramientas de control.

La primera síntesis compara las características que determinan la relevancia de cada agente en higiene industrial. Se priorizaron fuentes o procesos ocupacionales frecuentes, mecanismo o característica toxicológica dominante, principales complicaciones agudas y la observación preventiva que condiciona el control, de modo que la tabla no se limite a enumerar síntomas sino que conecte el daño con decisiones de seguridad operacional (9-14,18-30).

Tabla 1. Perfil técnico-toxicológico de gases tóxicos prioritarios en higiene industrial

Gas	Fuentes/procesos ocupacionales	Característica toxicológica	Complicaciones agudas principales	Observación preventiva crítica
CO	Combustión incompleta; motores, hornos, calderas, espacios confinados	Forma carboxihemoglobina y altera la disponibilidad/utilización de O ₂	Cefalea, mareo, confusión, síncope, daño neurológico y cardiovascular	Incoloro e inodoro; requiere detección instrumental y control de combustión/ventilación
H ₂ S	Aguas residuales, alcantarillado, petróleo, minería, descomposición orgánica	Toxicidad sistémica con inhibición mitocondrial; rápida incapacidad a alta concentración	Irritación, cefalea, pérdida de conciencia, convulsiones, insuficiencia respiratoria	El olfato se fatiga; alto riesgo en espacios confinados; medir antes y durante el ingreso
Cl ₂	Desinfección, tratamiento de agua, procesos químicos, mezclas incompatibles	Irritante/oxidante altamente reactivo	Quemadura ocular y respiratoria, tos, broncoespasmo, neumonitis, edema pulmonar	Segregar incompatibles, sistemas cerrados, ventilación y respuesta a fugas
NH ₃	Refrigeración industrial, fertilizantes,	Alta solubilidad; lesión de mucosas y vías respiratorias	Irritación ocular, disnea, sibilancias, dolor torácico, edema	Control de fugas, ventilación, protección

Gas	Fuentes/procesos ocupacionales	Característica toxicológica	Complicaciones agudas principales	Observación preventiva crítica
	agricultura y procesos químicos		pulmonar, quemaduras	ocular/facial y sensores adecuados
SO ₂	Combustión de combustibles con azufre y procesos industriales	Irritante respiratorio soluble	Irritación, tos, broncoconstricción y deterioro respiratorio	Control de combustión/emisión, extracción y vigilancia de picos
NO ₂	Combustión, soldadura y procesos químicos	Irritante oxidante con posible lesión pulmonar diferida	Tos, disnea, disminución funcional, edema pulmonar, cianosis	Extracción localizada, monitoreo de corta duración y seguimiento tras exposiciones relevantes

Fuente: elaboración a partir de NIOSH y evidencia clínica seleccionada (9-14,18-30).

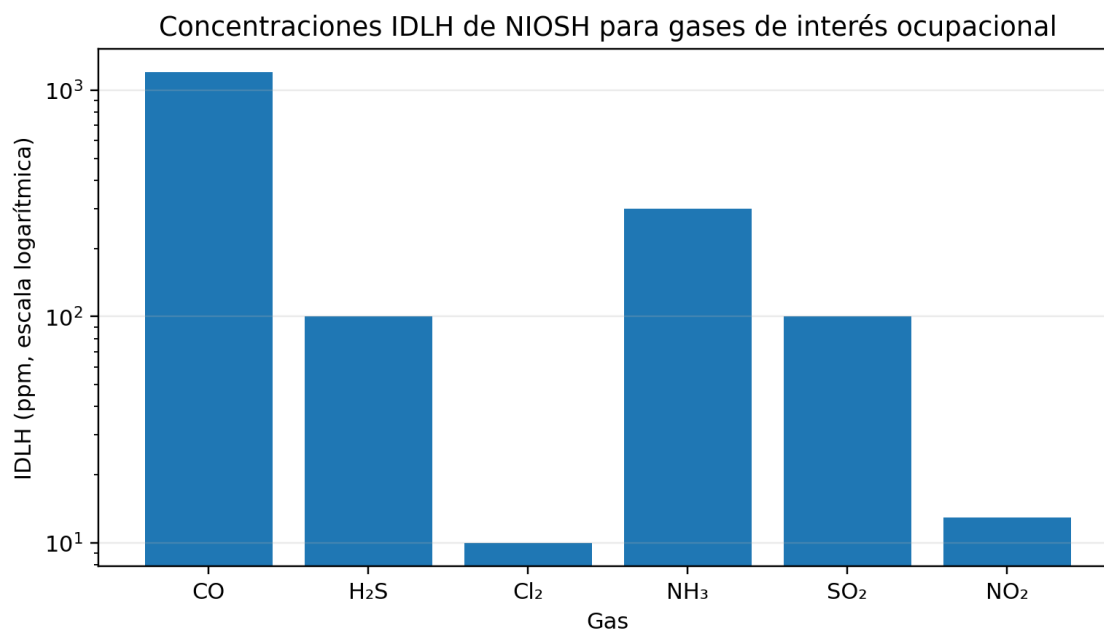
La Tabla 1 evidencia dos grandes patrones toxicológicos. CO y H₂S pueden producir deterioro neurológico y cardiovascular mediante alteraciones del transporte o utilización del oxígeno, por lo que la pérdida de conciencia puede aparecer sin una fase prolongada de irritación que advierta al trabajador. Cl₂, NH₃, SO₂ y NO₂ muestran un predominio irritativo respiratorio, aunque la gravedad puede progresar a broncoespasmo, neumonitis o edema pulmonar. Esta diferencia modifica la vigilancia: en asfixiantes químicos resulta crítica la detección instrumental aun sin signos sensoriales, mientras que en irritantes se requiere además controlar reactividad, contacto ocular, compatibilidades y liberaciones durante transferencia o mantenimiento.

Los perfiles también muestran que el olor no debe utilizarse como sistema de alarma. CO carece de olor, mientras que H₂S puede generar fatiga olfativa; en agentes irritantes, la percepción de un olor intenso puede indicar que la exposición ya ocurrió y no ofrece una medida cuantitativa fiable. Por ello, la evaluación preventiva debe combinar información del proceso con sensores, muestreo y alarmas ajustadas a criterios técnicos, además de procedimientos para actuar frente a desviaciones antes de que se produzca daño clínico (8-14).

La comparación de valores IDLH aporta una referencia para situaciones en las que una exposición aguda amenaza la vida, puede producir efectos irreversibles o impedir el escape. Estos valores no corresponden a límites de trabajo rutinario y no deben

utilizarse para autorizar una exposición, pero permiten dimensionar la rapidez con que una fuga puede convertir un ambiente en escenario de emergencia y orientar selección de protección respiratoria para ingreso planificado o rescate (9-16).

Gráfico 1. Concentraciones IDLH de NIOSH para seis gases tóxicos de interés ocupacional (ppm)



Fuente: elaboración a partir de NIOSH Pocket Guide (9-14).

Nota: La escala logarítmica facilita visualizar valores de diferente magnitud; IDLH no constituye un límite de exposición rutinaria.

El Gráfico 1 muestra una amplitud de dos órdenes de magnitud entre los valores IDLH seleccionados. Cl₂ presenta el valor más bajo, con 10 ppm, seguido por NO₂ con 13 ppm; H₂S y SO₂ se sitúan en 100 ppm, NH₃ en 300 ppm y CO en 1200 ppm. Esta distribución no implica que un gas sea “seguro” por tener un valor numérico mayor, porque los mecanismos de daño, la unidad temporal, las propiedades físicas y la respuesta clínica difieren, pero sí evidencia la necesidad de configurar alarmas y planes de entrada según el agente específico y no mediante un umbral genérico para todos los gases (9-14).

Desde la práctica de higiene industrial, la lectura del IDLH debe vincularse con escenarios de peor caso, ventilación, volumen del recinto, tasa de liberación y posibilidad de fallo de los sistemas de control. Una concentración desconocida o

potencialmente IDLH modifica de manera inmediata la selección respiratoria, ya que OSHA exige equipos de presión positiva adecuados para atmósferas IDLH y considera las atmósferas con deficiencia de oxígeno dentro de esa categoría salvo demostración técnica en condiciones específicas. Esta relación convierte el dato toxicológico en un criterio operacional para permisos de trabajo, rescate y respuesta a fugas (15,16).

Los límites ocupacionales para exposición rutinaria utilizan bases temporales distintas. NIOSH puede establecer promedio ponderado, límite de corta duración o techo, mientras que OSHA puede definir TWA, ceiling o picos máximos para determinados agentes. La Tabla 2 conserva esa diferencia para evitar una comparación incorrecta y añade los métodos analíticos listados en las fichas, lo que facilita relacionar criterio de exposición con capacidad de medición (9-14,17).

Tabla 2. Límites ocupacionales y métodos analíticos de referencia para los seis gases

Gas	NIOSH REL	OSHA PEL	IDLH NIOSH	Método(s) NIOSH	Método(s) OSHA
CO	TWA 35 ppm; C 200 ppm	TWA 50 ppm	1200 ppm	6604	ID209; ID210
H ₂ S	C 10 ppm [10 min]	C 20 ppm; pico 50 ppm [10 min]	100 ppm	6013	ID141
Cl ₂	C 0,5 ppm [15 min]	C 1 ppm	10 ppm	6011	ID101; ID126SGX
NH ₃	TWA 25 ppm; ST 35 ppm	TWA 50 ppm	300 ppm	3800; 6015; 6016	ID188
SO ₂	TWA 2 ppm; ST 5 ppm	TWA 5 ppm	100 ppm	3800; 6004	ID104; ID200
NO ₂	ST 1 ppm	C 5 ppm	13 ppm	6014	ID182

Fuente: NIOSH Pocket Guide y NIOSH Manual of Analytical Methods (9-14,17).

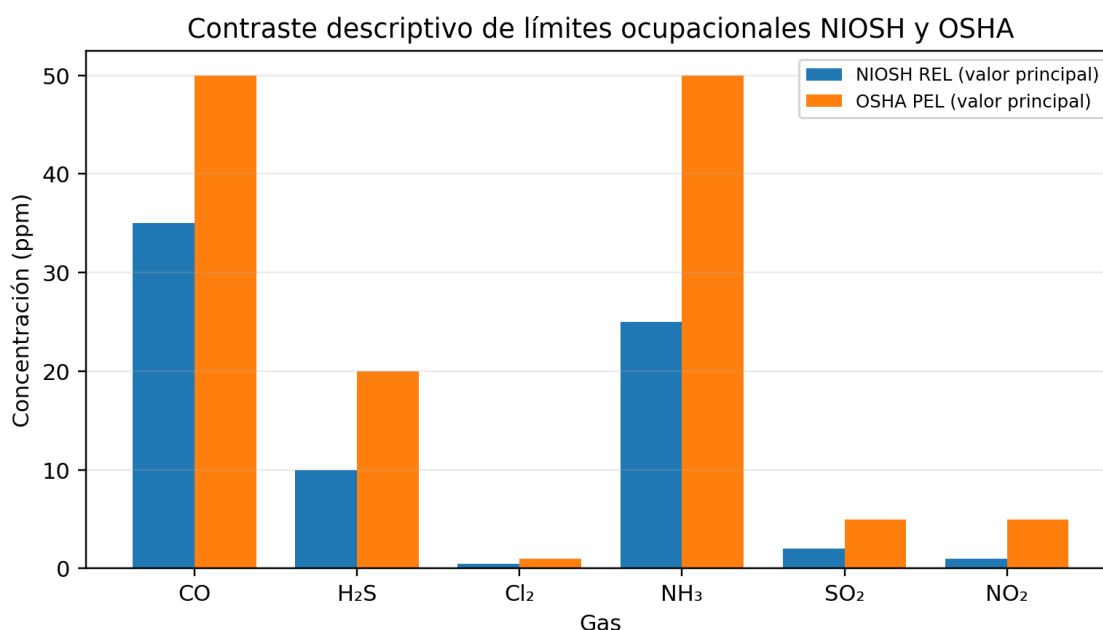
La Tabla 2 confirma que los valores numéricos no pueden interpretarse sin su base temporal. El CO utiliza TWA y un ceiling adicional en NIOSH; H₂S se controla mediante techo de diez minutos y OSHA añade un pico máximo específico; Cl₂ se expresa como ceiling; NH₃ y SO₂ incorporan TWA con límites de corta duración en NIOSH; NO₂ se expresa como límite de corta duración frente a un ceiling de OSHA. Estas diferencias responden a la toxicocinética y al patrón de daño esperado, por lo que

una estrategia de muestreo de jornada completa puede ser insuficiente para agentes cuyos efectos dependen de picos breves.

La disponibilidad de métodos NIOSH y OSHA proporciona rutas analíticas reconocidas, pero la selección final debe considerar rango de concentración, interferencias, sensibilidad, tiempo de muestreo y posibilidad de cambios rápidos. Los detectores directos son especialmente útiles para alarmas y decisiones inmediatas, mientras que los métodos integrados o de laboratorio aportan documentación cuantitativa para evaluación de exposición y cumplimiento. La práctica más robusta combina mediciones de distinta escala temporal en función de la tarea, evitando utilizar un promedio de jornada para ocultar episodios de alta intensidad (17).

Para visualizar la magnitud de los valores principales se construyó un contraste descriptivo entre NIOSH REL y OSHA PEL. Debido a que los límites no comparten siempre la misma base temporal, el gráfico no representa equivalencia regulatoria ni una razón de toxicidad, sino que permite observar cuánto varían las cifras de referencia entre agentes y organismos cuando se selecciona el valor principal de cada ficha (9-14).

Gráfico 2. Comparación descriptiva de valores principales NIOSH REL y OSHA PEL



Fuente: elaboración a partir de NIOSH Pocket Guide (9-14).

Nota: Los valores graficados tienen bases temporales diferentes (TWA, ST o ceiling); el contraste es descriptivo y no representa equivalencia toxicológica.

El Gráfico 2 muestra que CO y NH₃ poseen valores principales numéricamente más altos que los demás gases, mientras Cl₂, SO₂ y NO₂ operan en concentraciones de pocos ppm. H₂S ocupa una posición intermedia, con 10 ppm como ceiling NIOSH y 20 ppm como ceiling OSHA. La diferencia entre 0,5 ppm de Cl₂ y 50 ppm de CO o NH₃ demuestra por qué los detectores, rangos de calibración y procedimientos no son intercambiables. La medición debe diseñarse para el contaminante esperado y conservar precisión suficiente alrededor del criterio que se desea evaluar.

Las discrepancias entre NIOSH y OSHA no deben describirse como contradicciones simples, porque NIOSH emite recomendaciones de salud ocupacional y OSHA establece límites regulatorios dentro de su jurisdicción, además de utilizar bases temporales distintas según la sustancia. En una gestión preventiva basada en riesgo resulta prudente identificar todos los criterios aplicables, documentar cuál se adopta para el programa de higiene industrial y justificar decisiones más protectoras cuando el proceso, la susceptibilidad o la incertidumbre de medición lo aconsejen (4-6,8).

Además de los límites, la severidad depende de los órganos afectados y de la posibilidad de secuelas. La Tabla 3 integra los síntomas y órganos diana indicados por NIOSH con hallazgos clínicos recientes, permitiendo distinguir manifestaciones que funcionan como señales tempranas de aquellas asociadas con daño severo o persistente (9-14,18-30).

Tabla 3. Manifestaciones, órganos diana y evidencia clínica reciente por agente

Gas	Síntomas/manifestaciones destacadas	Órganos diana NIOSH	Hallazgos recientes relevantes
CO	Cefalea, taquipnea, náusea, debilidad, mareo, confusión, síncope	Cardiovascular, pulmones, sangre, SNC	Revisiones 2024 describen secuelas neurocognitivas/cardíacas y mecanismos mitocondriales
H ₂ S	Irritación ocular/respiratoria, apnea, coma, convulsiones, mareo, cefalea	Ojos, respiratorio, SNC	Revisiones recientes mantienen preocupación por secuelas neurológicas y toxicidad sistémica

Gas	Síntomas/manifestaciones destacadas	Órganos diana NIOSH	Hallazgos recientes relevantes
Cl ₂	Quemazón ocular/nasal, tos, ahogo, dolor subesternal, edema pulmonar, neumonitis	Ojos, piel, respiratorio	Revisión paraguas confirma importancia de retirar exposición y soporte respiratorio; exposiciones siguen notificándose
NH ₃	Irritación ocular/nasal/faríngea, disnea, sibilancias, dolor torácico, edema pulmonar	Ojos, piel, respiratorio	Revisión 2024 destaca necesidad de monitoreo y desarrollo de sensores selectivos para entornos laborales
SO ₂	Irritación ocular/nasal/faríngea, tos, broncoconstricción	Ojos, piel, respiratorio	Revisión 2026 y metaanálisis 2024 respaldan relevancia de mecanismos y desenlaces respiratorios
NO ₂	Irritación, tos, esputo espumoso, reducción funcional, dolor torácico, edema pulmonar	Ojos, respiratorio, cardiovascular	Metaanálisis 2024 de exposición prolongada aporta contexto sobre desenlaces respiratorios y cardiovasculares

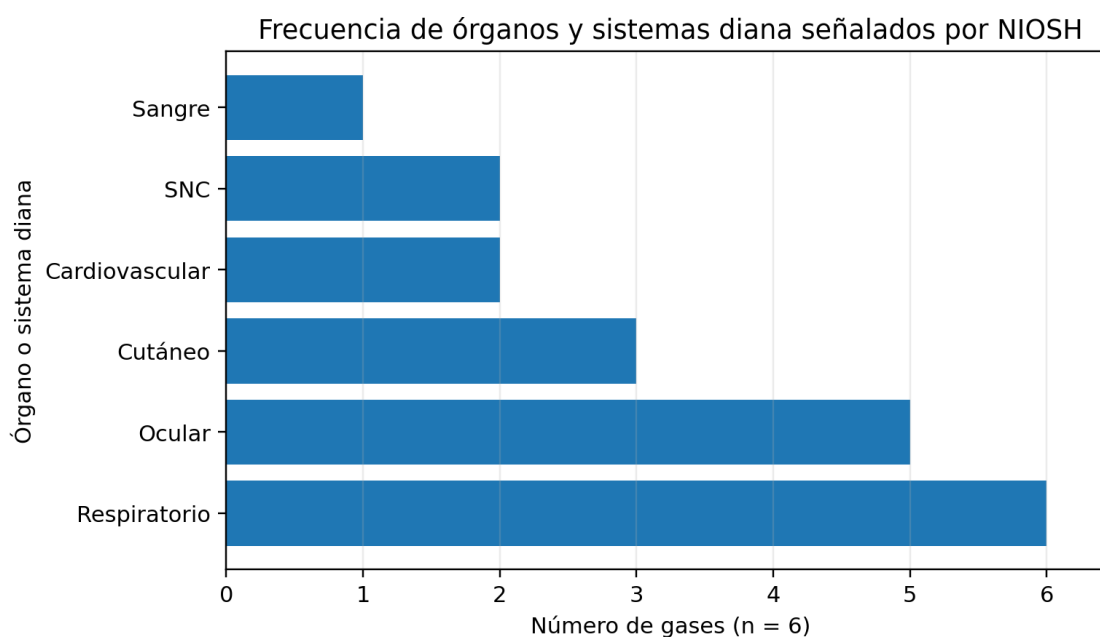
Fuente: elaboración a partir de NIOSH y literatura clínica seleccionada (9-14,18-30).

La Tabla 3 demuestra que el aparato respiratorio constituye el eje común de la exposición a los seis gases, aunque con expresiones distintas. En CO la lesión respiratoria no es el único mecanismo relevante, porque la hipoxia y la interacción con hemoproteínas explican parte del compromiso neurológico y cardiovascular; H₂S comparte afectación del sistema nervioso central y puede producir colapso rápido; Cl₂, NH₃, SO₂ y NO₂ presentan un patrón irritativo que puede progresar desde tos y disnea hasta lesión pulmonar grave. La presencia de síntomas oculares en cinco agentes refuerza la necesidad de protección facial y respuesta de descontaminación cuando corresponda.

La evidencia sobre secuelas añade una dimensión temporal a la vigilancia de la salud. CO puede asociarse con alteraciones neurocognitivas y cardíacas posteriores a la intoxicación aguda, mientras que H₂S presenta literatura sobre déficits neurológicos persistentes en sobrevivientes. Para irritantes respiratorios, la recuperación puede ser completa en exposiciones leves, pero los eventos severos justifican seguimiento por posible hiperreactividad, deterioro funcional o complicaciones pulmonares. La vigilancia médica debe, por tanto, vincularse con la historia real de exposición y no limitarse a exámenes rutinarios desconectados de los eventos registrados (18-30).

La frecuencia de órganos diana se codificó a partir de las seis fichas NIOSH para visualizar qué sistemas aparecen de forma repetida. Esta codificación es descriptiva y no pondera gravedad, dosis ni probabilidad, pero ayuda a identificar áreas clínicas y preventivas que deben estar disponibles en programas de vigilancia y respuesta (9-14).

Gráfico 3. Frecuencia de órganos y sistemas diana reportados por NIOSH en los seis gases



Fuente: elaboración propia mediante codificación de las fichas NIOSH (9-14).

Nota: El conteo representa presencia de cada órgano/sistema como diana y no pondera gravedad, dosis ni frecuencia clínica.

El Gráfico 3 confirma que el sistema respiratorio aparece como órgano diana en los seis gases, seguido por compromiso ocular en cinco. La piel figura en tres gases irritantes, mientras que sistema cardiovascular y sistema nervioso central aparecen en dos agentes cada uno y la sangre se identifica específicamente en CO. Este patrón apoya un enfoque de vigilancia escalonado: evaluación respiratoria como componente transversal, examen ocular y cutáneo cuando existe exposición a irritantes y valoración neurológica o cardiovascular cuando el perfil del gas o la intensidad del evento lo justifique.

La frecuencia no debe confundirse con severidad. El sistema nervioso central aparece en menos agentes, pero la pérdida de conciencia por CO o H₂S puede generar accidentes secundarios, caídas, incapacidad de escape y muerte en minutos. Del mismo modo, el

edema pulmonar por cloro, amoníaco o NO₂ puede evolucionar después de la exposición inicial. Por ello, los protocolos de emergencia deben considerar no solo qué órgano suele afectarse, sino qué evolución clínica es posible y cuánto tiempo puede transcurrir antes de que se manifiesten complicaciones relevantes (18-30).

La última síntesis organiza las medidas preventivas en función del punto del proceso donde actúan. Se incluyeron eliminación, sustitución, ingeniería, administración, monitoreo, protección personal y gestión de espacios confinados, integrando los principios de jerarquía con las posibilidades actuales de detección y con requisitos de respuesta a atmósferas peligrosas (4-7,15-17,31-36).

Tabla 4. Aplicación operativa de la jerarquía de controles, monitoreo y respuesta a emergencias

Nivel/función	Objetivo	Medidas aplicables	Verificación técnica
Eliminación	Retirar el peligro	Suprimir uso o generación del gas cuando el proceso pueda rediseñarse	Revisión de proceso, incidentes y cambios de materia prima
Sustitución	Reducir toxicidad/peligrosidad	Reemplazar por sustancia o tecnología menos peligrosa, evaluando riesgos nuevos	Evaluación comparativa de toxicidad, reactividad e inflamabilidad
Ingeniería	Controlar en la fuente o trayectoria	Encapsulamiento, sistemas cerrados, aislamiento, extracción localizada, ventilación, automatización	Medición de exposición, pruebas de ventilación, mantenimiento y alarmas
Administrativos	Organizar exposición y respuesta	Procedimientos, permisos, señalización, capacitación, restricción, inspecciones, simulacros	Auditorías, observaciones de tarea, registros de formación e incidentes
Monitoreo/detección	Conocer concentración y detectar desviaciones	Detectores personales/portátiles/fijos, alarmas, muestreo personal y de área	Calibración, pruebas funcionales, trazabilidad y comparación con OEL
EPP/respiratoria	Controlar riesgo residual	Protección ocular/facial, ropa química, guantes y respiradores seleccionados por peligro	Programa respiratorio, fit test, inspección, mantenimiento y entrenamiento
Espacios confinados/emergencia	Evitar exposición catastrófica y rescate secundario	Evaluación atmosférica, ventilación, aislamiento, permiso, vigilancia externa, rescate planificado	Registro de entrada, monitoreo continuo cuando proceda, simulacros y revisión postincidente

Fuente: elaboración a partir de NIOSH, OSHA, ISO 45001 y revisiones de sensores (4-7,15-17,31-36).

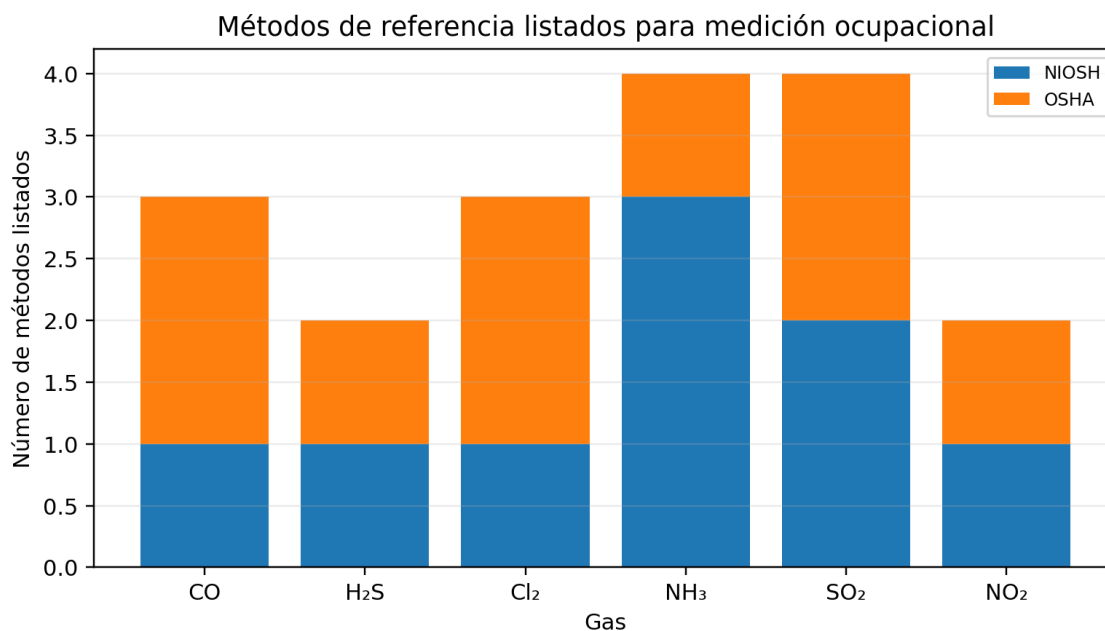
La Tabla 4 muestra que la prevención más robusta se construye por capas y no mediante una medida aislada. Eliminar una fuente o sustituir una sustancia reduce el peligro antes de que exista exposición; los controles de ingeniería limitan la liberación o separan al trabajador; los controles administrativos organizan tareas y respuesta; el monitoreo

confirma si el sistema funciona; el equipo de protección personal actúa como barrera residual. En espacios confinados, estas capas deben integrarse dentro de un permiso de entrada y una estrategia de rescate, porque una falla de ventilación o una generación inesperada puede cambiar la atmósfera con rapidez (5,6,15,16).

El monitoreo posee además una función de verificación del desempeño. Una concentración dentro de criterio no demuestra por sí sola que el proceso sea seguro en todo momento, pero series de datos representativos permiten detectar tendencias, identificar picos, evaluar mantenimiento y comprobar la eficacia de modificaciones de ingeniería. La incorporación de sensores conectados y análisis inteligente ofrece la posibilidad de generar alertas tempranas y trazabilidad continua, siempre que se controlen calibración, deriva e interferencias y que el sistema se pruebe bajo condiciones comparables con el ambiente de trabajo (31-36).

Como indicador descriptivo de la infraestructura metodológica, se contabilizaron los códigos de métodos NIOSH y OSHA que aparecen en las fichas de cada gas. El recuento no clasifica calidad ni disponibilidad comercial, pero muestra que existen procedimientos de referencia diferenciados y que un programa de higiene industrial puede apoyarse en más de una alternativa de medición para algunos agentes (9-14,17).

Gráfico 4. Número de métodos de referencia NIOSH/OSHA listados para medición ocupacional por gas



Fuente: elaboración a partir de las fichas NIOSH Pocket Guide y NMAM (9-14,17).

Nota: El número de métodos no representa calidad, sensibilidad ni facilidad de implementación; cada método debe seleccionarse según el escenario de exposición.

El Gráfico 4 evidencia que NH₃ y SO₂ presentan cuatro métodos listados en conjunto, CO y Cl₂ tres, y H₂S y NO₂ dos. Esta variación ilustra que la estrategia analítica debe seleccionarse con conocimiento de las alternativas disponibles, y que el número de métodos no sustituye la evaluación de desempeño. En gases con cambios rápidos, el método de laboratorio puede complementarse con lectura directa; en evaluaciones de cumplimiento o caracterización de jornada, un muestreo integrado puede ofrecer mayor representatividad, siempre que su tiempo de colección sea coherente con el tipo de límite que se desea comparar.

En conjunto, los resultados vinculan tres dimensiones que frecuentemente se analizan por separado: toxicidad, cuantificación y control. La evidencia clínica define qué daño se pretende prevenir, los valores de exposición y los métodos permiten determinar cuánto contaminante alcanza al trabajador, y la jerarquía de controles establece dónde intervenir para reducir el riesgo. La integración de estas dimensiones resulta especialmente importante en tareas no rutinarias, mantenimiento, limpieza, arranque, parada y rescate, donde las concentraciones pueden diferir de las condiciones normales

y la dependencia exclusiva del equipo de protección personal puede resultar insuficiente.

Los hallazgos sostienen finalmente que la vigilancia ambiental y la vigilancia de la salud deben comunicarse entre sí. Un patrón de síntomas en un grupo de trabajadores puede justificar revisar la estrategia de muestreo, mientras que un pico detectado o una alarma puede indicar la necesidad de evaluación médica aun cuando la exposición haya sido breve. Esta retroalimentación convierte los registros de medición, incidentes, cuasi accidentes, mantenimiento y salud en información para la mejora continua, en consonancia con la lógica de sistemas de gestión de seguridad y salud ocupacional (7).

Discusión

La evidencia integrada confirma que la exposición a gases tóxicos constituye un problema multidimensional en el que la toxicología, la higiene industrial, la ingeniería, la medicina ocupacional y la gestión de emergencias deben operar de forma coordinada. El hallazgo transversal de afectación respiratoria no implica homogeneidad, porque CO y H₂S pueden incapacitar por mecanismos sistémicos y neurológicos, mientras que Cl₂, NH₃, SO₂ y NO₂ producen un componente irritativo prominente. Esta diversidad explica por qué una política general de “uso de respirador” resulta científicamente débil si no se acompaña de identificación del agente, medición, ventilación, compatibilidad química y respuesta específica (4-16).

La amplitud observada en los valores IDLH, desde 10 ppm para cloro hasta 1200 ppm para monóxido de carbono, es una demostración cuantitativa de esa heterogeneidad. El valor menor no representa automáticamente una mayor carga de enfermedad en cualquier escenario, pero sí informa sobre el orden de concentración en el que una atmósfera puede convertirse en inmediatamente peligrosa y modifica decisiones de

emergencia. En la práctica, la concentración real puede aumentar con rapidez durante una fuga, por lo que el diseño de alarmas debe considerar agente, velocidad de liberación, ventilación y tiempo necesario para evacuar, evitando umbrales genéricos aplicados indistintamente (9-16).

El monóxido de carbono ilustra de manera clara la insuficiencia de los sentidos como barrera preventiva. Su ausencia de color y olor impide una advertencia natural, mientras que las revisiones de Savioli y colaboradores y de Dent y colaboradores describen mecanismos capaces de producir daño neurológico y cardiovascular incluso después de retirar al paciente de la fuente (18,19). La concordancia entre la ficha NIOSH y la literatura clínica refuerza la necesidad de detectores en procesos de combustión y espacios con ventilación limitada, así como de investigación de cualquier episodio de cefalea, mareo o síncope agrupado entre trabajadores expuestos.

La revisión de Weaver añade que la valoración de intoxicación por CO no puede descansar únicamente en una cifra aislada, pues el contexto de exposición, los síntomas y la evolución determinan la conducta clínica (20). Trasladado al ámbito preventivo, el mismo principio indica que un monitoreo puntual no representa necesariamente el perfil completo de una jornada. Motores, hornos, calderas, arranque de equipos y tareas de mantenimiento pueden generar picos que un promedio diluye, por lo que la combinación de lectura directa y muestreo representativo es más congruente con la variabilidad real del proceso.

El H₂S presenta un reto adicional por la pérdida rápida de la capacidad olfativa. La revisión de Batterman y colaboradores muestra que existe discusión científica sobre efectos a bajas concentraciones y que muchos estudios están limitados por error de medición y confusión, pero la incertidumbre no justifica utilizar el olor como criterio de seguridad (21). Por el contrario, la incertidumbre refuerza la conveniencia de medir de

manera objetiva y de mantener controles que reduzcan la exposición tanto en condiciones normales como durante picos, especialmente en alcantarillado, aguas residuales, petróleo, minería y descomposición orgánica.

Las revisiones de Santana Maldonado y colaboradores, Ng y colaboradores, y Rumbelha y Kim coinciden en que la intoxicación aguda por H_2S puede comprometer sistemas respiratorio, cardiovascular y neurológico, y que una parte de los sobrevivientes puede presentar secuelas persistentes (22-24). Esta evidencia es relevante para la salud ocupacional porque demuestra que el indicador de éxito no debe limitarse a la supervivencia de un accidente. Un programa completo necesita documentar la exposición, realizar seguimiento clínico cuando corresponda, investigar causas y corregir condiciones del proceso para evitar recurrencias.

El cloro muestra una relación directa entre reactividad química y daño respiratorio. La revisión paraguas de Nambiema y colaboradores señaló que la retirada de la exposición posee una base de evidencia sólida dentro del manejo inicial, mientras que la evidencia para algunas intervenciones terapéuticas específicas es menos consistente (25). Desde la prevención, este resultado favorece medidas que impidan la generación o liberación: segregación de incompatibles, automatización de dosificación, ventilación, detección, capacitación y procedimientos que prohíban mezclas no autorizadas, de forma que el control ocurra antes de que la atención clínica sea necesaria.

Los datos de Atalla y colaboradores sobre exposiciones a cloro y cloraminas notificadas en Estados Unidos muestran que los eventos accidentales siguen siendo actuales y que la intensificación de prácticas de desinfección puede modificar su frecuencia (26). Aunque gran parte de esos casos ocurrió en entornos residenciales, el mecanismo de generación por mezcla de productos es plenamente relevante para servicios de limpieza, mantenimiento, laboratorios y tratamiento de aguas. La transferencia al ámbito laboral

debe realizarse con cautela, pero sustenta la importancia de la comunicación de peligros y del entrenamiento práctico sobre incompatibilidades químicas.

El amoníaco combina alta solubilidad, efecto irritante y uso extendido en refrigeración, fertilizantes y procesos industriales. Reis y colaboradores destacaron la necesidad de mejorar herramientas de detección y revisaron tecnologías de narices electrónicas con potencial para entornos de trabajo (27). Esta línea de investigación coincide con el resultado de la presente síntesis, donde NH_3 dispone de varios métodos de referencia pero continúa necesitando sensores capaces de responder de forma selectiva y estable.

La innovación tecnológica aporta valor cuando se integra con ventilación, mantenimiento de sistemas de refrigeración, alarmas y planes de aislamiento de fugas.

Para SO_2 , la revisión de Stauffer y Tat proporciona una actualización sobre mecanismos y efectos tóxicos, mientras que el metaanálisis de Zhou y colaboradores aporta evidencia epidemiológica ambiental sobre desenlaces respiratorios (28,29). La diferencia entre exposición ambiental y ocupacional impide trasladar directamente los riesgos por unidad de concentración, pero la coincidencia en el aparato respiratorio fortalece la plausibilidad de daño y la necesidad de vigilancia en operaciones de combustión o procesos que liberen compuestos de azufre. El principio preventivo debe ser reducir exposición, no buscar una concentración que se interprete como ausencia absoluta de riesgo.

La evidencia sobre NO_2 sigue una lógica similar. Kasdagli y colaboradores actualizaron la revisión y metaanálisis que sustentó las guías de calidad del aire y observaron asociaciones con múltiples desenlaces de mortalidad, incluida enfermedad respiratoria, en exposiciones de largo plazo (30). Las concentraciones ambientales son diferentes de las ocupacionales y los desenlaces provienen de cohortes poblacionales, por lo que no corresponde convertir esos resultados en límites laborales; sin embargo, sí permiten

contextualizar que la exposición inhalatoria sostenida a NO₂ tiene relevancia biológica y que los sistemas de extracción en combustión y soldadura deben tratarse como controles esenciales.

La comparación de límites NIOSH y OSHA evidencia un punto metodológico de importancia: TWA, STEL y ceiling responden a preguntas diferentes. Un TWA estima exposición promedio durante un periodo, un STEL protege frente a exposiciones breves y un ceiling pretende impedir que la concentración supere un valor. Si el higienista selecciona un tiempo de muestreo incompatible con la base temporal del criterio, el resultado puede parecer aceptable mientras oculta un pico peligroso. La evaluación debe comenzar, por tanto, por la pregunta de exposición que se intenta responder y después seleccionar instrumento, duración, ubicación y frecuencia de muestreo (4,8-17).

Los resultados sobre métodos analíticos muestran que la existencia de varios procedimientos por sustancia no elimina la necesidad de competencia técnica. El NMAM subraya la importancia de seleccionar el mejor método disponible para cada situación, considerando desempeño y protocolo de muestreo (17). En la práctica, la precisión analítica pierde valor si la muestra se toma lejos de la zona respiratoria cuando se necesita exposición personal, si se omite una tarea de alta emisión o si el detector no se calibra. La calidad del dato depende de todo el proceso de medición, no únicamente del equipo o del laboratorio.

La evolución de sensores puede reducir algunas de esas limitaciones. Baharfar y colaboradores describen nanosensores orientados a seguridad minera, donde portabilidad y respuesta rápida pueden favorecer alertas en ambientes dinámicos (31). Yaqoob y Younis destacan el potencial del aprendizaje automático para mejorar selectividad y procesamiento de señales, mientras que Gardner y colaboradores revisan sensores térmicos micromecanizados con ventajas de estabilidad y consumo (32,33).

Estas tecnologías abren posibilidades para vigilancia distribuida, pero la transición hacia uso ocupacional exige validación frente a interferentes, condiciones de humedad, temperatura, envejecimiento y requerimientos de mantenimiento.

Las plataformas microfluídicas revisadas por Yeganegi y colaboradores y los diseños semiconductores analizados por Humayun y colaboradores muestran una tendencia hacia miniaturización, mayor sensibilidad y aplicaciones en punto de uso (34,35). Zong y colaboradores amplían esa tendencia al integrar sensores, comunicación inalámbrica, inteligencia artificial y sistemas de alerta en tiempo real (36). Desde la higiene industrial, el avance más relevante no es únicamente detectar concentraciones más bajas, sino disponer de información fiable en el momento y lugar donde se toman decisiones, con capacidad para registrar tendencias y activar controles antes de que la exposición alcance niveles críticos.

Sin embargo, una red de sensores no sustituye la jerarquía de controles. Detectar una fuga con mayor rapidez reduce el tiempo de respuesta, pero no elimina la fuente; por ello, la prioridad continúa siendo evitar el uso del agente cuando sea posible, sustituirlo por alternativas menos peligrosas y diseñar sistemas cerrados o ventilados. El monitoreo funciona como verificación y alarma, mientras que la ingeniería actúa sobre la generación o dispersión. Esta distinción es importante para evitar que la disponibilidad de tecnologías sofisticadas produzca una falsa sensación de control cuando persisten procesos abiertos o mantenimiento deficiente (5,6,31-36).

La jerarquía también redistribuye la responsabilidad preventiva. Cuando la seguridad depende exclusivamente de que cada trabajador recuerde colocarse un respirador, reconocer un olor o abandonar a tiempo un área, el sistema conserva una elevada dependencia de factores humanos. La eliminación, sustitución y los controles de ingeniería reducen esa dependencia porque modifican el peligro o la exposición antes

del contacto. Los controles administrativos siguen siendo necesarios para organizar permisos, mantenimiento, capacitación e inspecciones, pero su eficacia aumenta cuando respaldan un proceso técnicamente controlado en lugar de compensar deficiencias de diseño (5,6).

La protección respiratoria conserva un papel indispensable en tareas con riesgo residual, mantenimiento, emergencias e ingreso a atmósferas peligrosas. OSHA establece que la selección debe basarse en el peligro respiratorio y que, cuando la concentración es desconocida, la atmósfera debe considerarse IDLH, exigiendo equipos apropiados de presión positiva (15). Esta condición resulta especialmente crítica para CO, H₂S, cloro, amoníaco, SO₂ y NO₂ porque los valores IDLH son específicos y algunos gases pueden acumularse con rapidez. La disponibilidad de un respirador de cartucho no equivale, por tanto, a capacidad de ingreso seguro ante cualquier fuga.

Los espacios confinados concentran varias de las debilidades del enfoque basado solo en EPP. La posibilidad de deficiencia de oxígeno, estratificación, liberación continua, inflamabilidad y dificultad de rescate exige evaluación atmosférica previa, ventilación, aislamiento, permiso, comunicación y vigilancia externa (16). El documento base señalaba que uno de los errores más graves consiste en entrar a rescatar sin evaluar la atmósfera, generando víctimas múltiples; la evidencia normativa respalda esta preocupación y justifica que el rescate se planifique antes del ingreso, con personal, equipos y comunicaciones disponibles.

La vigilancia médica debe interpretarse como mecanismo de detección temprana y seguimiento, no como permiso para mantener una exposición mal controlada. Las alteraciones funcionales pueden señalar fallas preventivas, pero esperar a que aparezcan síntomas contradice el principio de anticipación. Los hallazgos de secuelas por CO y H₂S muestran la necesidad de documentar eventos agudos, mientras que la literatura

sobre irritantes respalda atención a función respiratoria y síntomas persistentes. La selección de pruebas debe ajustarse al agente y al riesgo, evitando programas rutinarios que acumulen exámenes sin conexión con datos ambientales o tareas reales (18-30).

La integración de registros ambientales y de salud genera una oportunidad para prevención basada en datos. Si una alarma se repite durante una operación concreta, el patrón puede orientar una modificación de ventilación o mantenimiento; si aumentan síntomas respiratorios en un área, puede revisarse el mapa de exposición y la estrategia de muestreo. De forma semejante, incidentes y cuasi accidentes aportan información sobre barreras fallidas antes de que exista daño grave. ISO 45001 enfatiza seguimiento, evaluación del desempeño e investigación de incidentes, lo que permite incorporar la higiene industrial dentro de ciclos de mejora y no como campañas de medición aisladas (7).

La capacitación mantiene un valor decisivo porque los trabajadores conocen variaciones operativas que no siempre aparecen en procedimientos formales. Una formación efectiva debe explicar qué gas puede generarse, qué significa una alarma, cuáles son los síntomas iniciales, qué incompatibilidades existen, qué equipo corresponde y qué acciones están prohibidas durante una emergencia. La participación de quienes ejecutan la tarea puede identificar puntos de fuga, operaciones no rutinarias y prácticas informales que un análisis documental no detecta. Este conocimiento debe incorporarse a la selección de controles sin transferir al trabajador la responsabilidad exclusiva por el riesgo (4-7).

La situación de actividades mineras resulta especialmente pertinente para el contexto ecuatoriano, no porque los seis gases tengan la misma presencia en todas las minas, sino porque la combinación de espacios subterráneos, equipos de combustión, voladuras, ventilación, mantenimiento y sustancias químicas crea escenarios cambiantes. El

informe de la OIT de 2024 confirma que las exposiciones químicas en minería continúan siendo un problema global y que trabajadores de países de ingresos bajos y medios pueden presentar mayor vulnerabilidad (3). La aplicación local requiere caracterizar cada operación y no extrapolar automáticamente perfiles de otras industrias. Una fortaleza del análisis radica en haber relacionado datos oficiales de límites, IDLH, métodos y órganos diana con evidencia clínica reciente y con principios de control. Esta triangulación permite evitar dos extremos: una revisión exclusivamente médica que describa síntomas sin explicar cómo prevenir la exposición, y una revisión exclusivamente normativa que enumere límites sin considerar la gravedad de las complicaciones. La síntesis muestra que el desarrollo de la higiene industrial adquiere sentido cuando la medición se utiliza para orientar decisiones sobre el proceso y proteger la salud, no cuando se limita a producir números para un informe.

La principal limitación deriva del carácter narrativo e integrativo de la revisión. No se realizó una búsqueda sistemática con conteo exhaustivo de registros ni evaluación formal de riesgo de sesgo para cada estudio, por lo que no se puede estimar prevalencia global, incidencia ocupacional ni efecto combinado. Además, parte de la evidencia reciente sobre SO_2 y NO_2 procede de exposición ambiental, útil para contextualizar mecanismos y desenlaces pero no directamente equivalente a concentraciones laborales. Estas restricciones se manejaron evitando metaanálisis artificiales y utilizando los datos oficiales de NIOSH y OSHA únicamente para comparaciones descriptivas.

Otra limitación se relaciona con las diferencias regulatorias entre países. Los valores NIOSH y OSHA se utilizaron porque se encuentran bien documentados y permiten una comparación reproducible entre agentes, pero no sustituyen los límites legales o recomendaciones aplicables en Ecuador u otras jurisdicciones. La práctica profesional debe identificar el marco normativo vigente, así como valores técnicos adicionales

cuando corresponda. La contribución del artículo consiste en mostrar una metodología de integración entre límite, medición, daño y control que puede adaptarse a diferentes sistemas regulatorios sin modificar los principios preventivos fundamentales.

La heterogeneidad clínica también exige prudencia. Una concentración ambiental no predice de forma determinista la severidad individual, porque influyen duración, carga física, ventilación pulmonar, comorbilidades, uso de protección, coexposiciones y tiempo hasta el rescate. Por ello, los valores límite no deben interpretarse como una frontera biológica exacta ni los IDLH como niveles a los que pueda trabajarse rutinariamente. La evaluación de riesgo debe integrar incertidumbre y utilizar márgenes preventivos, especialmente ante trabajadores susceptibles, procesos variables o escenarios donde una falla pueda tener consecuencias catastróficas.

Las futuras investigaciones deberían fortalecer datos ocupacionales específicos sobre exposición real, secuelas a largo plazo, desempeño de sensores en campo y efectividad de controles de ingeniería bajo condiciones industriales. Resulta particularmente útil desarrollar estudios longitudinales que conecten mediciones personales con indicadores de salud y registros de tareas, así como validaciones independientes de sensores inteligentes frente a métodos de referencia. En contextos latinoamericanos, la disponibilidad de evidencia propia permitiría evaluar diferencias de proceso, clima, organización del trabajo y capacidad de respuesta, reduciendo la dependencia de extrapolaciones desde países con sistemas productivos y regulatorios distintos.

La innovación en detección también plantea una futura línea de gestión: integrar alarmas personales y estacionarias con mantenimiento predictivo, ventilación automatizada y registros centralizados, manteniendo mecanismos de verificación que eviten depender de algoritmos opacos. Un sistema inteligente debería informar concentración, tendencia, estado de calibración y contexto de la tarea, y permitir que la

alerta desencadene acciones previamente definidas. La tecnología aporta mayor valor cuando se integra en un sistema de decisión transparente que conserva redundancias y capacidad humana de intervención ante fallas de sensores, comunicaciones o energía (31-36).

En síntesis, la discusión muestra una convergencia entre la evidencia clínica reciente y la lógica preventiva consolidada: los gases analizados pueden producir daño grave y, en algunos casos, secuelas persistentes, mientras que los mecanismos más sólidos de prevención actúan antes del contacto. La higiene industrial moderna necesita combinar conocimiento del agente, evaluación cuantitativa, controles en la fuente, monitoreo continuo cuando el riesgo lo justifica, programas de protección respiratoria, vigilancia de salud y preparación para emergencias. El énfasis técnico debe permanecer en reducir la probabilidad y magnitud de exposición, no en normalizar la presencia del contaminante mediante dependencia permanente del EPP.

Conclusiones

El análisis permitió establecer que las complicaciones asociadas a CO, H₂S, Cl₂, NH₃, SO₂ y NO₂ representan un problema prioritario para la higiene industrial por su capacidad de producir daño respiratorio, neurológico, cardiovascular, ocular y sistémico, con perfiles de toxicidad y valores de emergencia diferentes. Esta heterogeneidad confirma que la prevención debe partir de la identificación precisa del agente, el proceso y las condiciones de exposición, sin depender de la percepción sensorial como mecanismo de alerta.

Los resultados mostraron que los valores IDLH y los límites de exposición empleados por NIOSH y OSHA responden a bases temporales distintas, entre ellas TWA, STEL y ceiling, por lo que la evaluación higiénica debe seleccionar el método de medición según el tipo de exposición que se pretende caracterizar. El monitoreo personal, las mediciones de área, la lectura directa y el muestreo de corta duración resultan complementarios, especialmente en procesos variables donde una concentración promedio puede ocultar picos peligrosos.

La jerarquía de controles constituye la estrategia preventiva central, con prioridad para eliminación y sustitución, seguida por encapsulamiento, aislamiento, sistemas cerrados, ventilación localizada, automatización, sensores y alarmas. Los controles administrativos y la capacitación deben respaldar procesos técnicamente controlados, mientras que el equipo de protección personal permanece como última barrera. La vigilancia de la salud complementa la evaluación ambiental y debe ajustarse al perfil toxicológico y a los eventos documentados de exposición, sin sustituir el control del contaminante en la fuente.

Los espacios confinados requieren medidas reforzadas por la posible coexistencia de gases tóxicos, deficiencia de oxígeno y atmósferas inflamables, de modo que la

evaluación atmosférica previa, el monitoreo durante la tarea, la ventilación, el aislamiento de fuentes, la comunicación, la vigilancia externa y la planificación del rescate resultan indispensables. La tecnología de detección puede mejorar la respuesta mediante sensores personales, equipos multigás y redes de alarma, pero su eficacia depende de calibración, selectividad, mantenimiento y compatibilidad con métodos de referencia, por lo que no reemplaza los controles de ingeniería.

El aporte principal radica en integrar complicaciones clínicas, criterios de exposición, métodos de medición y jerarquía de controles dentro de una misma perspectiva técnica de salud y seguridad ocupacional. El desarrollo de la higiene industrial frente a gases tóxicos debe orientarse hacia una prevención basada en riesgo, datos y control en la fuente, articulando monitoreo ambiental, vigilancia de la salud, mantenimiento, investigación de incidentes y participación de los trabajadores. Las futuras investigaciones deberán ampliar la evidencia ocupacional longitudinal y validar tecnologías de monitoreo en condiciones reales, especialmente en contextos latinoamericanos, manteniendo la anticipación, el reconocimiento, la evaluación y el control como un ciclo continuo de mejora preventiva.

Referencias Bibliográficas

1. International Labour Organization. Exposure to hazardous chemicals at work and resulting health impacts: a global review [Internet]. Geneva: ILO; 2021 [cited 2026 Sep 4]. Available from:
<https://www.ilo.org/publications/exposure-hazardous-chemicals-work-and-resulting-health-impacts-global>
2. World Health Organization. Exposure to hazardous chemicals [Internet]. Geneva: WHO; [cited 2026 Sep 4]. Available from:
<https://www.who.int/tools/occupational-hazards-in-health-sector/exposure-to-hazardous-chemicals>
3. International Labour Organization. Chemical exposures in mining: impacts for occupational safety and health [Internet]. Geneva: ILO; 2024 [cited 2026 Sep 4]. Available from: <https://www.ilo.org/publications/chemical-exposures-mining>
4. Occupational Safety and Health Administration. Chemical hazards and toxic substances: overview [Internet]. Washington (DC): U.S. Department of Labor; [cited 2026 Sep 4]. Available from: <https://www.osha.gov/chemical-hazards>
5. National Institute for Occupational Safety and Health. Hierarchy of controls [Internet]. Atlanta: Centers for Disease Control and Prevention; 2024 [cited 2026 Sep 4]. Available from:
<https://www.cdc.gov/niosh/hierarchy-of-controls/index.html>
6. Occupational Safety and Health Administration. Chemical hazards and toxic substances: controlling exposure [Internet]. Washington (DC): U.S. Department of Labor; [cited 2026 Sep 4]. Available from:
<https://www.osha.gov/chemical-hazards/controlling-exposure>

7. International Organization for Standardization. ISO 45001:2018 Occupational health and safety management systems - Requirements with guidance for use [Internet]. Geneva: ISO; 2018 [cited 2026 Sep 4]. Available from:
<https://www.iso.org/standard/63787.html>
8. National Institute for Occupational Safety and Health. NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards [Internet]. Atlanta: Centers for Disease Control and Prevention; [cited 2026 Sep 4]. Available from:
<https://www.cdc.gov/niosh/npg/default.html>
9. National Institute for Occupational Safety and Health. Carbon monoxide: NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards [Internet]. Atlanta: Centers for Disease Control and Prevention; [cited 2026 Sep 4]. Available from:
<https://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0105.html>
10. National Institute for Occupational Safety and Health. Hydrogen sulfide: NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards [Internet]. Atlanta: Centers for Disease Control and Prevention; [cited 2026 Sep 4]. Available from:
<https://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0337.html>
11. National Institute for Occupational Safety and Health. Chlorine: NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards [Internet]. Atlanta: Centers for Disease Control and Prevention; [cited 2026 Sep 4]. Available from:
<https://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0115.html>
12. National Institute for Occupational Safety and Health. Ammonia: NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards [Internet]. Atlanta: Centers for Disease Control and Prevention; [cited 2026 Sep 4]. Available from:
<https://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0028.html>

13. National Institute for Occupational Safety and Health. Sulfur dioxide: NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards [Internet]. Atlanta: Centers for Disease Control and Prevention; [cited 2026 Sep 4]. Available from:
<https://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0575.html>
14. National Institute for Occupational Safety and Health. Nitrogen dioxide: NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards [Internet]. Atlanta: Centers for Disease Control and Prevention; [cited 2026 Sep 4]. Available from:
<https://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0454.html>
15. Occupational Safety and Health Administration. 29 CFR 1910.134 Respiratory protection [Internet]. Washington (DC): U.S. Department of Labor; [cited 2026 Sep 4]. Available from:
<https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.134>
16. Occupational Safety and Health Administration. 29 CFR 1910.146 Permit-required confined spaces [Internet]. Washington (DC): U.S. Department of Labor; [cited 2026 Sep 4]. Available from:
<https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.146>
17. National Institute for Occupational Safety and Health. NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM), 5th edition [Internet]. Atlanta: Centers for Disease Control and Prevention; [cited 2026 Sep 4]. Available from:
<https://www.cdc.gov/niosh/nmam/>
18. Savioli G, Gri N, Ceresa IF, Piccioni A, Zanza C, Longhitano Y, et al. Carbon monoxide poisoning: from occupational health to emergency medicine. *J Clin Med*. 2024;13(9):2466. doi:10.3390/jcm13092466.

19. Dent MR, Rose JJ, Tejero J, Gladwin MT. Carbon monoxide poisoning: from microbes to therapeutics. *Annu Rev Med.* 2024;75:337-351.
doi:10.1146/annurev-med-052422-020045.
20. Weaver LK. Carbon monoxide poisoning (reprinted from the 2023 Hyperbaric Indications Manual 15th edition). *Undersea Hyperb Med.* 2024;51(3):253-276.
PMID:39348519.
21. Batterman S, Grant-Alfieri A, Seo SH. Low level exposure to hydrogen sulfide: a review of emissions, community exposure, health effects, and exposure guidelines. *Crit Rev Toxicol.* 2023;53(4):244-295.
doi:10.1080/10408444.2023.2229925.
22. Santana Maldonado C, Weir A, Rumbelha WK. A comprehensive review of treatments for hydrogen sulfide poisoning: past, present, and future. *Toxicol Mech Methods.* 2023;33(3):183-196. doi:10.1080/15376516.2022.2121192.
23. Ng PC, Hendry-Hofer TB, Witeof AE, Brenner M, Mahon SB, Boss GR, et al. Hydrogen sulfide toxicity: mechanism of action, clinical presentation, and countermeasure development. *J Med Toxicol.* 2019;15(4):287-294.
doi:10.1007/s13181-019-00710-5.
24. Rumbelha WK, Kim DS. Neurological sequelae of acute hydrogen sulfide poisoning: a literature review, controversies, and knowledge gaps. *Neurol Int.* 2025;17(5):71. doi:10.3390/neurolint17050071.
25. Nambiema A, Coyo G, Barbe-Richaud JB, Blottiaux J, Retière-Doré N, Sembajwe G, et al. Human chlorine gas exposition and its management - an umbrella review on human data. *Crit Rev Toxicol.* 2022;52(1):32-50.
doi:10.1080/10408444.2022.2035317.

26. Atalla A, Shulman J, Rose J, Lynch M. Trends in chlorine and chloramine gas exposures reported to United States poison centers. *Clin Toxicol (Phila)*. 2024;62(9):589-595. doi:10.1080/15563650.2024.2390139.
27. Reis T, Moura PC, Gonçalves D, Ribeiro PA, Vassilenko V, Fino MH, et al. Ammonia detection by electronic noses for a safer work environment. *Sensors (Basel)*. 2024;24(10):3152. doi:10.3390/s24103152.
28. Stauffer CB, Tat J. Toxic effects of sulfur dioxide: a review. *Toxics*. 2026;14(1):100. doi:10.3390/toxics14010100.
29. Zhou X, Wang X, Shen Q, Ma J, Cai X, Liu H, et al. Short-term exposure to sulfur dioxide and the occurrence of chronic obstructive pulmonary disease: an updated systematic review and meta-analysis based on risk of bias and certainty of evidence. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2024;284:116888. doi:10.1016/j.ecoenv.2024.116888.
30. Kasdagli MI, Orellano P, Pérez Velasco R, Samoli E. Long-term exposure to nitrogen dioxide and ozone and mortality: update of the WHO Air Quality Guidelines systematic review and meta-analysis. *Int J Public Health*. 2024;69:1607676. doi:10.3389/ijph.2024.1607676.
31. Baharfar M, Lin J, Kilani M, Zhao L, Zhang Q, Mao G. Gas nanosensors for health and safety applications in mining. *Nanoscale Adv*. 2023;5(22):5997-6016. doi:10.1039/D3NA00507K.
32. Yaqoob U, Younis MI. Chemical gas sensors: recent developments, challenges, and the potential of machine learning - a review. *Sensors (Basel)*. 2021;21(8):2877. doi:10.3390/s21082877.
33. Gardner ELW, Gardner JW, Udrea F. Micromachined thermal gas sensors - a review. *Sensors (Basel)*. 2023;23(2):681. doi:10.3390/s23020681.

34. Yeganegi A, Yazdani K, Tasnim N, Fardindoost S, Hoorfar M. Microfluidic integrated gas sensors for smart analyte detection: a comprehensive review. *Front Chem.* 2023;11:1267187. doi:10.3389/fchem.2023.1267187.
35. Humayun M, Bououdina M, Usman M, Khan A, Luo W, Wang C. Designing state-of-the-art gas sensors: from fundamentals to applications. *Chem Rec.* 2024;24(3):e202300350. doi:10.1002/tcr.202300350.
36. Zong B, Wu S, Yang Y, Li Q, Tao T, Mao S. Smart gas sensors: recent developments and future prospective. *Nano-Micro Lett.* 2025;17:54. doi:10.1007/s40820-024-01543-w.