



## Protocolo De Manejo Al Personal Bomberil Que Ha Sufrido Intoxicación Por Inhalación De Gases Tóxicos En Un Incendio Estructural

*Protocol for Managing Firefighting Personnel Who Have Suffered Intoxication from Inhaling Toxic Gases in a Structural Fire*

Carlos Edwin Mendoza Alarcón <sup>1</sup> 

carloredoza111@hotmail.com

**Instituto Tecnológico Superior Universitario Oriente (ITSO)**

Riobamba, Ecuador

Benjamín Gabriel Quito Cortez <sup>2</sup> 

benjaminquito@bqc.com.ec

**Instituto Tecnológico Superior Universitario Oriente (ITSO)**

Riobamba, Ecuador

Segundo Martin Quito Cortez <sup>3</sup> 

martinquito@bqc.com.ec

**Instituto Tecnológico Superior Universitario Oriente (ITSO)**

Riobamba, Ecuador

**Recepción: 06-11-2024**

**Aceptación: 16-06-2025**

**Publicación: 29-07-2025**

**Como citar este artículo:** Martínez, L; Quito, B; Vásquez, J. (2025) **Protocolo De Manejo Al Personal Bomberil Que Ha Sufrido Intoxicación Por Inhalación De Gases Tóxicos En Un Incendio Estructural**. *Metrópolis*. Revista de Estudios Globales Universitarios, 6 (1), pp. 2005-2056.

<sup>1</sup> Tecnólogo Superior en Control de Incendios y Operaciones de Rescate (ITECSUR); Tecnólogo en seguridad y salud ocupacional. Instituto Superior Tecnológico Oriente (ITSO); Maestrante en Herramientas de Seguridad Industrial y Salud en el Trabajo. (ITSO).

<sup>2</sup> Abogado, Magister en Educación (Universidad Bicentenario de Aragua) Venezuela, Magister en Ciencias Gerenciales (Universidad internacional del caribe y América latina) Curacao, Doctor en Ciencias de la Educación PHD (UBA) Venezuela, Doctor en Ciencias Gerenciales PHD (universidad internacional del caribe y América latina) Curacao, Postdoctorado en Ciencias de la Educación (UBA) Venezuela.

<sup>3</sup> Ingeniero Agrónomo (UNIVERSIDAD CATOLICA DE CUENCA), Magister en Desarrollo Local, Mención Planificación, Desarrollo y Ordenamiento Territorial (UNIVERSIDAD CATOLICA DE CUENCA); Doctor en Ciencias de la Educación (UNIVERSIDAD BICENTENARIO DE ARAGUA) VENEZUELA, Rector Instituto Superior Tecnológico CIC YASUNI Docente



### Resumen

El riesgo y la probabilidad de padecer enfermedades profesionales a causa de la exposición a gases tóxicos en el funcionamiento de un incendio estructural son altamente peligrosos para un bombero. Esta revisión bibliográfica implementa un protocolo integral de manejo a la altura de la evidencia más actual. Se revisaron varias publicaciones durante los años 2019 y posteriores en las bases de datos de PubMed, Scopus y Web of Science, así como las recomendaciones de otras organizaciones como NFPA, YNIOSH e IbnSinaOMS. El estudio propone identificar los bloqueos graves para el protocolo: evaluación sistemática primaria y secundaria, severidad de exposición, implementación de monitoreo biométrico, tratamiento de intoxicación con énfasis en asfixia por químicos, irritantes respiratorios, sensibilizantes pulmonares, estrategias avanzadas de oxigenoterapia, descontaminación, rehabilitación cardiopulmonar, apoyo psicosocial y vigilancia médico longitudinal. Los resultados corroboran que la cuarta parte de las lesiones que sufren los bomberos suceden al exponerse a productos de combustión. El establecimiento de protocolos estandarizados disminuye hasta el sesenta por ciento las complicaciones graves derivadas de estas lesiones. El estudio resalta la necesidad de un enfoque más integrado que vaya más allá de la atención médica inmediata para incorporar medidas preventivas y un seguimiento a largo plazo, especialmente considerando los nuevos materiales de construcción modernos que emiten hasta un 300% más de gases tóxicos que sus contrapartes más antiguas. El protocolo propuesto está dirigido a optimizar procesos en un esfuerzo por disminuir la incidencia y las tasas de mortalidad debido a la exposición ocupacional a gases tóxicos durante incendios estructurales. **Palabras claves:** Intoxicación, bomberos, gases, incendios, protocolo.

### Abstract

The risk and probability of suffering occupational diseases due to exposure to toxic gases in structural fires are highly dangerous for firefighters. This literature review implements a comprehensive management protocol based on the most current evidence. Various publications from 2019 onwards were reviewed in PubMed, Scopus, and Web of Science databases, as well as recommendations from organizations such as NFPA, NIOSH, and IbnSinaWHO. The study identifies critical components for the protocol: systematic primary and secondary assessment, severity of exposure, implementation of biometric monitoring, treatment of intoxication with emphasis on chemical asphyxiants, respiratory irritants, pulmonary sensitizers, advanced oxygen therapy strategies, decontamination, cardiopulmonary rehabilitation, psychosocial support, and longitudinal medical surveillance. The findings confirm that one-fourth of firefighter injuries occur due to exposure to combustion products. The establishment of standardized care protocols reduces serious complications from these injuries by up to sixty percent. The study highlights the need for a more integrated approach that goes beyond immediate medical attention to incorporate preventive measures and long-term follow-up, especially considering modern building materials that emit up to 300% more toxic gases than their older counterparts. The proposed protocol aims to optimize processes in an effort to decrease the incidence and mortality rates due to occupational exposure to toxic gases during structural fires. **Keywords:** Intoxication, firefighters, gases, fires, protocol.



## **Introducción.**

Los incendios en edificios representan una amenaza para la seguridad estructural y la salud ocupacional y la seguridad de los bomberos. No solo debido a las llamas que participan activamente en extinguir, sino también debido a las sustancias gaseosas nocivas que inhalan. Según la National Fire Protection Association, NFPA (2023) las lesiones sufridas durante la realización de actividades de combate de incendios en conexión con el Combate de Incendios Estructurales, aproximadamente el 45 por ciento de las lesiones sufridas por los bomberos están relacionadas con la exposición a productos de combustión.

La quema de materiales sintéticos modernos en construcciones da lugar a una novedosa e intrincada combinación de productos nocivos que incluyen monóxido de carbono (CO), cianuro de hidrógeno (HCN), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y otros muchos compuestos orgánicos volátiles (Fabia et al., 2020). Estos productos son altamente peligrosos. Muchas veces su uso es inevitable y, no obstante, el empleo de herramientas para proteger la respiración hace mitigar estos riesgos. Sin embargo, problemas como la descompensación con el uso de la fase de 'overhaul' pueden dar paso a intoxicaciones severas (Burgess et al., 2021).

Harrison et al. (2022) sobre el tema llevó a cabo un estudio multicéntrico en 157 bomberos en Estados Unidos y observó que el 23 % del personal operativo está expuesto al menos una vez en su vida profesional a un episodio de intoxicación por gas. Lo que más destaca son las posibles consecuencias para la salud, como las neurosis y las disfunciones cardíacas, que son extremadamente severas. Tales detalles se suman a la extensa lista



de argumentos que abogan por la necesidad de adoptar un procedimiento operativo estándar para la gestión de este tipo de emergencias.

Este estudio tiene como propósito crear un protocolo holístico y fundamentado que esté dirigido a tratar a los bomberos que han sufrido intoxicación a causa de inhalación de gases nocivos durante períodos de tiempo en que hubo un incendio. La pregunta que se explora en la investigación es: ¿Cuáles son los principios y el orden ideal de intervenciones para la atención de bomberos que han sufrido intoxicación por inhalación de gases tóxicos durante incendios estructurales? A partir de lo metodológico se realizó un levantamiento sistemático de las guías internacionales, casos clínicos y protocolos existentes de los años 2019 – 2024. Se realizó una búsqueda en las bases de datos de PubMed, Scopus y Web of Science, y también en las recomendaciones hechas por NFPA, NIOSH e IbnSinaOMS.

El enfoque de este trabajo radica en su capacidad de estandarizar el tratamiento terapéutico y, por ende, reducir la morbilidad y letalidad esperada en diferentes tipos de intoxicación y, al mismo tiempo, mejorar el fracaso clínico de los bomberos accidentados por gas. De acuerdo con Wong y Smith (2023), la adopción de protocolos estandarizados puede disminuir en un 60% los casos de graves complicaciones generadas por el uso de gases nocivos en bomberos.

Este estudio también discute la necesidad de actualizar los protocolos existentes con un enfoque en las nuevas tendencias en materiales de construcción y tecnologías emergentes de los nuevos cambios que están ocurriendo en el equipo de protección personal. Según los estudios más recientes de Chen y Roberts (2023), los materiales de construcción



modernos pueden producir hasta un 300% más de gases nocivos en comparación con los materiales tradicionales, lo que requiere una constante supervisión y elevación de los protocolos de atención.

### **Marco Teórico.**

Un enfoque holístico para analizar la extensión del uso de gases tóxicos durante incendios estructurales requiere entender el marco del problema en cuestión y las regulaciones de seguridad para bomberos pertinentes. El incendio estructural es definido por la NFPA (2023) como un fuego incontrolado dentro de un espacio confinado que amenaza el marco estructural o los contenidos de un edificio o estructura. Este tipo de incendio se caracteriza por la generación de subproductos de combustión altamente letales que son numerosos.

El humo junto con los gases tóxicos creados durante el incendio depende del material que se ha utilizado para construir el edificio. Existen más de cien contaminantes del aire en escenarios modernos de incendio estructural que, según lo informado por Fabian et al (2020). El gas venenoso más importante es el monóxido de carbono (CO), la hipoxia tisular se produce debido a la formación de carboxihemoglobina con tejido que tiene una afinidad 250 veces mayor que el oxígeno. Otro subproducto común, el cianuro de hidrógeno (HCN), inhibe el uso del oxígeno a nivel celular al bloquear el citocromo c oxidasa.

La fisiopatología detrás de la toxicidad de los gases durante los incendios es bastante compleja. De manera similar, como han identificado Burgess et al., la intoxicación por gases tiene muchos efectos, tanto indirectos como directos. Además, los efectos tóxicos pueden dividirse en:



- Asfixiantes químicos (CO, HCN)
- Irritantes respiratorios (acroleína, formaldehído)
- Sensibilizantes pulmonares (isocianatos)
- Agentes carcinógenos (hidrocarburos aromáticos policíclicos)

El marco legal que regula la seguridad bomberil se fundamenta en diversos instrumentos normativos. La NFPA 1500 (2023) establece los requisitos mínimos para programas de seguridad y salud ocupacional en servicios de bomberos, mientras que la NFPA 1584 proporciona directrices específicas para la rehabilitación de bomberos durante operaciones de emergencia. La Occupational Safety and Health Administration, OSHA (2023) exige mediante la norma 29 CFR 1910.134 el uso de protección respiratoria adecuada y establece los parámetros para programas de protección respiratoria.

Complementariamente, el National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH (2022) desarrolla estándares para la certificación de equipos de protección respiratoria. La exposición ocupacional a los vapores tóxicos está sujeta a límites específicos. Harrison y colegas (2022) sostienen que los valores límite de umbral (TLV) definidos por la American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH (2021) son referencias internacionales, aunque las condiciones hiperdinámicas de los incendios hacen que su aplicación sea extremadamente difícil.

La comprensión de los efectos a largo plazo ha avanzado considerablemente, lo que ha resultado en el desarrollo de programas de vigilancia médica apropiados. Chen y Roberts (2023) informaron un aumento de casos de enfermedades respiratorias crónicas y cáncer entre



los bomberos que están expuestos repetidamente a entornos tóxicos, lo que ha moldeado las regulaciones de seguridad en su vida.

Los Equipos de protección personal, EPP son la primera línea de defensa. Los Equipos de Respiración Autónomos (ERA) deben cumplir con la NFPA 1981 (2023), que establece requisitos de diseño, certificación y pruebas. Wong y Smith (2023) demostraron que la estricta adherencia a los protocolos de uso de ERA reduce significativamente el riesgo de inhalar gases tóxicos.

De acuerdo con lo establecido en la NFPA 1561, los sistemas de comando y control de incidentes forman una estructura organizativa para gestionar emergencias, incluyendo el nombramiento de oficiales de seguridad y procedimientos para delegar responsabilidades. La documentación y el informe para exposiciones de OSHA son esenciales para el trabajo de gestión de casos médicos y estudios epidemiológicos.

La norma NFPA 1001 exige que todo el personal debe estar capacitado para reconocer situaciones de emergencia y su interacción con entornos potencialmente peligrosos. Según Davidson et al. (2023), es imperativo recibir capacitación adicional sobre el uso de instrumentos de detección de gas, así como sobre los procesos de desinfección posteriores.

El desarrollo de protocolos de atención se fundamenta en guías internacionales como las del European Resuscitation Council, ERC (2023) o de la American Heart Association, AHA (2023), a quienes se han incorporado elementos sobre el contexto particular de intoxicación por gases en incendios. El enfoque de la atención se ha hecho más sistemático,



comenzando por la evaluación inicial estandarizada, el tratamiento específico del tóxico y el seguimiento a largo plazo.

Kawamoto y Miller (2023) desarrollaron, además, un sistema de biosensores que integra la monitorización fisiológica de los operadores durante la realización de labores, permitiendo así la detección temprana de efectos fisiológicos derivados de la exposición a gases nocivos. El sistema, que fue presentado en 45 departamentos de bomberos, mostró una disminución del 73% en el tiempo de respuesta a exposiciones peligrosas.

La limpieza tras un evento tiene la misma relevancia que el mismo evento en sí. Los pone a uno en un estado muy peligroso. Por lo menos hay que hacer una revisión post evento. Según lo indicaron Thompson et al. (2022), los elementos de protección personal poseen la capacidad de recibir contaminantes. Estos elementos pueden seguir “ventilando” sustancias nocivas para la salud durante un lapso de 3 días después de ser expuestos. A partir de su trabajo de investigación, Quebrada Mackenzie sugiere la limpieza de campo para conseguir una exposición secundaria de 11 por ciento en el personal.

Las consecuencias psicosociales de eventos críticos, en particular de las intoxicaciones severas, empiezan a tener mayor importancia dentro de los protocolos. Estas son porciones que no se han abordado a fondo. Un hecho es que Nakamura y González (2023) encontraron que muchos de los marcadores de un complejo de estrés postraumático en bomberos resultaron de trabajos en condiciones de gran toxicidad. Este resultado resalta la idea de tener apoyo psicológico en las intervenciones que se van a realizar.



El adelanto de la medicina aumenta la efectividad de los tratamientos. Un trabajo importante que se pienso Anderson et al. (2024) es que el uso de antídoto específico en un envenenamiento por cianuro retarda la muerte en un 45 por ciento si se aplica dentro de los 15 minutos de la exposición. Esos datos son de base para informaciones nuevas que alteran los protocolos de atención en fuera del hospital.

Yoshida y Clark (2023) han analizado el “Atmósfera IDLH” (“Inmediatamente Peligrosa para la Vida o la Salud”) que como concepto está ligado a la evaluación de riesgos y lo han vuelto a ponderar. De acuerdo a su estudio, los niveles de riesgo modernos la tendrían particularmente subestimada en situaciones de incendio que involucran el uso de materiales compuestos más sofisticados.

## **Estado del Arte**

Los protocolos de monitoreo para el personal de bomberos expuestos a los humos tóxicos de incendios estructurales han desarrollado considerablemente en los últimos años. La literatura científica documenta un enfoque bastante completo y basado en evidencia para este grave problema que lesiona a miles de bomberos en todo el mundo cada año.

Fent et al. (2020) de NIOSH, en su trabajo con 24 departamentos de bomberos, informaron que la exposición a gases de incendio produjo efectos cardiovasculares medibles incluso con el uso de equipos de protección respiratoria, lo que enfatizó la necesidad de un monitoreo cardíaco posterior a la exposición. Informaron cambios significativos en la variabilidad de la frecuencia cardíaca y los marcadores inflamatorios incluso 24 horas después de la exposición. Al mismo tiempo, Rosales-García et al. (2020) encontraron en 23 departamentos españoles que los



protocolos estándar de atención inmediata con evaluación y oxigenoterapia temprana redujeron las complicaciones severas en un 67%. Su estudio destacó la importancia extremadamente crítica de los primeros 15 minutos después de la exposición y creó un algoritmo de toma de decisiones clínicas para la evaluación inicial.

Baxter et al. (2021) analizaron biomarcadores específicos de 347 bomberos pertenecientes al Departamento de Bomberos de Cincinnati con el objetivo de establecer criterios objetivos para la evaluación inicial. Su estudio presentó el descubrimiento de un conjunto particular de seis biomarcadores clave que se alteraron significativamente después de la exposición a toxinas, lo que permitió estratificar el riesgo de manera más precisa. En América Latina, Mendoza-Torres y Ramírez (2021) demostraron que el uso de listas de verificación estándar en 12 departamentos de bomberos aumentó la adherencia al protocolo en un 85% y redujo los errores de evaluación en un 73%. Propusieron un modelo de implementación que puede ser adaptado a varios entornos y niveles de recursos.

Gainey et al. (2022) lograron implementar un Protocolo de Evaluación Post-Exposición del Departamento de Bomberos de Chicago que disminuyó el tiempo hasta la intervención terapéutica en un 64%. Su protocolo consistió en una rápida evaluación neurológica, análisis de gases en sangre y examen cardio-pulmonar estandarizado. Al mismo tiempo, Park et al. (2022) transformaron el monitoreo en Seúl con sensores portátiles que pudieron detectar niveles críticos de humo tóxico, incluyendo monóxido de carbono y cianuro de hidrógeno junto con otros compuestos orgánicos volátiles, con una asombrosa sensibilidad del 97%.



El consorcio FIREFIGHT (2023) desarrolló un protocolo que incluye 15 países europeos, utilizando un estudio de 127 trabajos realizados. Este protocolo contempla la evaluación neurológica temprana y la monitorización cardiorrespiratoria continua. Esta guía incluye algoritmos de decisión de diferentes pasos a diferentes niveles de exposición y establece criterios claros para la activación de recursos especializados. El término “dinámicamente de preocupación” fue importado a Australia gracias al trabajo de Thompson y Anderson (2023), lo que permite analizar en tiempo real los parámetros ambientales y estructurales de un sitio y clasificar con precisión el riesgo de envenenamiento.

En el área de rehabilitación, Smith et al. (2023) de Skidmore College demuestran que los protocolos estructurados mejoran significativamente la función pulmonar post-exposición al disminuir los marcadores de estrés oxidativo. El programa integra ejercicios de respiración específicos, así como control cardiopulmonar durante la rehabilitación. A su vez, Sánchez – López et al. (2023) redujeron el tiempo de recuperación del protocolo de ventilación y ejercicios de expansión pulmonar en el 56% en España.

Kirk et al. (2023) y Wilson y Roberts (2023) se centraron en la evaluación de técnicas de descontaminación y desarrollaron protocolos de campo particulares con tres fases que redujeron la exposición secundaria en un 86% a un 92%. Su investigación estableció ciertas pautas para la descontaminación de equipos y personal junto con la limpieza y disposición de desechos contaminados. Nakamura y Chen (2024) afirmaron la dimensión psicológica al apoyar la introducción de la evaluación psicológica en la etapa inicial y determinaron los factores de riesgo para el trastorno de estrés postraumático en etapas posteriores con supervisión.



Las últimas tecnologías han sido incorporadas en la investigación más reciente: en el estudio de Horn et al. (2024), se realizó un monitoreo fisiológico en tiempo real utilizando sensores integrados en el equipo de protección personal, mientras que Martínez-Gonzalez et al. (2024) crearon un algoritmo de inteligencia artificial que aumentó la precisión diagnóstica para la enfermedad primaria en un 88% y redujo el tiempo para el inicio del tratamiento específico. Peterson y Smith (2024) proporcionaron nuevos estándares de monitoreo ambiental de precisión mediante sistemas multiparamétricos con un 96% de sensibilidad y más de veinte tipos diferentes de compuestos tóxicos.

## **Desarrollo.**

### **Evaluación y atención inicial del personal bomberil expuesto a gases tóxicos**

#### **Protocolos de evaluación primaria y secundaria en el lugar del incidente**

Un aspecto esencial para mitigar la morbilidad y mortalidad asociadas a las exposiciones durante los incendios es la adecuada evaluación sistemática y oportuna del personal bomberil que ha sufrido exposición a gases tóxicos durante los incendios estructurales. La NFPA tiene normas específicas en su norma NFPA 1584, a la cual se le denomina adoptar e implementar, que para la evaluación y rehabilitación de los bomberos durante las emergencias proporciona una estructura ordenada. Esta norma destaca la necesidad de establecer protocolos de atención médica que permitan monitorear signos de intoxicación progresivos a condiciones de riesgo, muerte.

Cada paso que se derive de la norma debe comenzar en el área de rehabilitación asignada y, idealmente, debe comenzar dentro de los cinco



minutos después de que se complete el ejercicio. La evaluación sigue el ABCDE (Vía aérea, Respiración, Circulación, Discapacidad, Exposición) adaptado al contexto de la toxicidad por gases químicos. Burgess et al. (2020) demostraron que el seguimiento sistemático de este protocolo dentro de una matriz de 124 bomberos expuestos a productos de combustión permitió identificar el 87% de los casos de intoxicación moderada a severa. Lo más importante durante la evaluación de la vía aérea es el hecho de que los irritantes respiratorios pueden causar edema laríngeo y broncoespasmo, que pueden ocurrir o progresar rápidamente.

En la evaluación del paciente, se debe prestar atención a la frecuencia, profundidad, simetría de los movimientos y la saturación de oxígeno, que debe ser superior al 94%. Como argumentan Fent et al. (2020a), cuando la saturación es inferior al 92%, se convierte en un marcador temprano para la toxicidad por monóxido de carbono con esa sensibilidad del 78.3%. La escala AVDN permite evaluar el nivel de conciencia y, si se realiza regularmente, ayuda a identificar el deterioro neurológico progresivo de algunas formas de intoxicaciones, como la del cianuro de hidrógeno.

El examen secundario es mucho más exhaustivo y debe realizarse dentro de los 20 minutos posteriores a la exposición. Incluye documentación de signos vitales completos, evaluación del estado mental, inspección de mucosas, piel y vías respiratorias superiores en busca de irritación o quemaduras químicas y se inicia la historia clínica. En el trabajo de Baxter et al. (2021) se destaca la necesidad de registrar con detalle la cantidad de tiempo estimada de la exposición, si se contaba con un equipo de protección respiratoria, así como si este funcionó, ya que esto cambiaba en



gran medida la posibilidad de intoxicación severa por el agente considerado.

El uso de listas de chequeo ha mejorado la precisión y disminuido el olvido en el diagnóstico y las evaluaciones. Fent et al. (2020b) informaron que la implementación de una lista de verificación específicamente para diagnóstico de intoxicación por gases en bomberos, se incrementó el reconocimiento de casos que requerían tratamiento médico urgente en un 32% de las ocasiones. Estas listas por lo menos deben contener los siguientes parámetros: A y O x 1, frecuencia y patrón respiratorio, pulso oxímetro, frecuencia cardíaca, presión arterial, temperatura, color de piel y mucosas, como también la presencia de hollín en vías respiratorias y cefalea o síntomas neurológicos.

El registro sistemático de cada exposición es uno de los elementos que no puede faltar en el protocolo de evaluación. Según Engelsman et al. (2020), registrarse en la base de datos para exposiciones de este tipo no solo permite un mejor manejo, sino que permite relacionar patrones de exposiciones con resultados clínicos en el futuro. Esta información debe incluir la cantidad de tiempo y condiciones de la exposición, la materia que se estaba quemando, equipo de protección personal usado, hallazgos de la evaluación primaria y secundaria, y las intervenciones realizadas.

### **Criterios de clasificación y triaje según nivel de exposición y sintomatología.**

Una clasificación eficiente de los bomberos expuestos al humo tóxico hace el mejor uso de los recursos al asignar prioridades basadas en la intensidad y duración de la exposición. Driscoll et al. (2023) informaron que la adopción de un sistema estandarizado reduce el tiempo de latencia en



intervenciones críticas de tratamiento para intoxicaciones moderadas a severas en un 38%.

"Que el triaje tenga un componente de estratificación del riesgo siempre comienza por detectar el componente gaseoso predominante (ya sea un asfixiante químico, un irritante respiratorio, un sensibilizador pulmonar o un carcinógeno). Navarro et al. (2019) sugirieron un modelo de clasificación basado en biomarcadores específicos y características clínicas con un 92% de sensibilidad para detectar intoxicaciones que requieren atención inmediata. Este sistema determina el nivel de conciencia, la saturación de oxígeno, la frecuencia respiratoria, los cambios hemodinámicos y ciertos síntomas específicamente asociados con el tóxico."

El algoritmo de clasificación define cuatro categorías de prioridad:

**Categoría Roja (Atención Inmediata):** Casos con nivel de conciencia alterado (Glasgow <13), saturación de oxígeno <88% incluso con oxigenoterapia, inestabilidad hemodinámica o falla respiratoria severa. Burgess et al. (2020) notaron que los criterios estaban asociados con un aumento cinco veces mayor en el riesgo de complicaciones cardiopulmonares graves dentro de las 24 horas.

**Categoría Amarilla (Atención Urgente):** Requiere evaluación médica en los primeros 30 minutos y monitoreo continuo. Pacientes con taquipnea moderada (>24 respiraciones/minuto), cefalea severa, náuseas o irritación severa a vías respiratorias superiores. Aproximadamente el 22% deteriorará a categoría roja sin intervención. Saturación de oxígeno entre 89 - 93% (Jones et al., 2022).



Categoría Verde (Observación): Requiere observación de 4 a 6 horas en monóxido de carbono. Personal con tos, leve irritación de ojos, vías aéreas superiores (vómitos, cefalea) y saturación de oxígeno de 94-96%. Se observa exposición tardía de síntomas.

Categoría Blanca (Asintomáticos): Se consideran asintomáticos a una persona expuesta sin síntomas y con parámetros normales. Fent et al. (2020a) recomiendan evaluación de seguimiento dentro de las 24 horas, ya que el 7-12% desarrolla síntomas tras la exposición a materiales sintéticos modernos.

Las listas de verificación estandarizadas mejoran la precisión en la categorización. Según Engelsman et al. (2020), tras la incorporación de instrumental específico de triaje para gases en bomberos, se logró una disminución del 43% en clasificaciones erróneas.

Debería haber criterios bien definidos para referir pacientes a centros especializados. Según Baxter et al. (2021), indican los siguientes criterios para la referencia a centros con terapia de oxígeno hiperbárico: niveles de carboxihemoglobina superiores al 25%, disturbios neurológicos frecuentes, isquemia miocárdica evidente, acidosis metabólica severa o exposición prolongada (> 45 minutos) a altas concentraciones de monóxido de carbono.

### **Implementación de sistemas de monitorización biométrica y detección temprana**

La tecnología de vanguardia ha transformado los sistemas de biomonitorización de bomberos y detección temprana de intoxicaciones. Estos sistemas van más allá del viejo paradigma y ofrecen la posibilidad de



monitoreo continuo de parámetros fisiológicos críticos, capturando cambios que son mínimos y pueden eludir la detección durante evaluaciones promedio. Fent et al. (2020b) reportaron una reducción del 62% en el tiempo para detectar intoxicaciones de moderadas a severas. Esto se suma a una intervención más oportuna y una reducción del 37% en complicaciones severas.

Los dispositivos modernos tienen múltiples sensores que miden simultáneamente la saturación de oxígeno en sangre periférica, la frecuencia cardíaca, electrocardiogramas simplificados, la temperatura corporal, la frecuencia respiratoria y la variabilidad de la frecuencia cardíaca, que es un indicador de estrés. Estos dispositivos fueron probados en el campo por Burgess et al. (2020) con 87 bomberos expuestos a productos de combustión. La correlación entre mediciones portátiles y hospitalarias superó el 93%.

Ha habido un progreso significativo con la integración del monitoreo ambiental. Actualmente, además de medir parámetros fisiológicos en tiempo real, los sistemas también cuentan con sensores para monitorear concentraciones de monóxido de carbono, cianuro de hidrógeno, dióxido de carbono y compuestos orgánicos volátiles. Navarro et al. (2019) demostraron que esta estrategia combinada permite identificar situaciones de riesgo antes de la manifestación de síntomas, lo que permite evacuaciones preventivas y evita exposiciones severas en un 48%.

Estos sistemas han añadido biomarcadores. Engelsman et al. (2020) encontraron que combinar carboxihemoglobina, lactato, troponina y marcadores de estrés oxidativo produce una sensibilidad del 91% para detectar efectos adversos tempranos debido a la exposición a humos



tóxicos. Estas nuevas tecnologías permiten el monitoreo directo de estos parámetros en el campo.

Para que estos objetivos se alcancen, Jones et al. (2022) sugieren el uso de umbrales de alarma basados en la variación de la línea base individual en lugar de umbrales preestablecidos fijos. Este método reduce el número de falsas alarmas en un 67% y aumenta la especificidad de los casos más graves. Cada protocolo debe detallar cómo se maneja cada nivel de alerta, desde una vigilancia aumentada hasta la evacuación inmediata.

Dificultades económicas, logísticas y de capacitación presentan obstáculos para la implementación. Driscoll et al. (2023) estudiaron la eficiencia de costos de estos sistemas y, incluso con los costos iniciales, el ahorro por reducción en el ausentismo, complicaciones médicas y dependencia de recursos especializados más que justifica su adopción. Aun así, la sofisticación debe adaptarse a los recursos y el entorno operativo de cada departamento de bomberos.

Los factores clave para una implementación exitosa se combinan con sistemas existentes, facilidad de uso, tolerancia a condiciones extremas y generación de datos básicos de entrenamiento interpretable. Baxter et al. (2021) argumentan que la tecnología avanzada se vuelve inútil cuando genera datos que son incomprensibles o inaplicables durante emergencias.

### **Tratamiento específico según el tipo de intoxicación por gases**

#### **Manejo de intoxicación por asfixiantes químicos (CO, HCN) y administración de antídotos**

La intoxicación por monóxido de carbono y cianuro de hidrógeno resulta ser de las más mortales para un bombero en medio de un incendio



estructural. Este tipo de intoxicación provoca daño por asfixia. En este caso, el oxígeno se encuentra disponible en el ambiente, pero no puede ser utilizado a nivel celular, cada agente requiere un tratamiento especializado. El reconocimiento y el tratamiento precoz son vitales para reducir la morbimortalidad a estos casos de intoxicación.

El efecto tóxico del monóxido de carbono se produce principalmente por su unión a la hemoglobina, formando carboxihemoglobina con una afinidad aproximadamente 250 veces mayor que el oxígeno. Este proceso no solo reduce la capacidad de transporte de oxígeno, sino que también desplaza la curva de disociación de la hemoglobina hacia la izquierda, disminuyendo la liberación de oxígeno a los tejidos.

La evaluación diagnóstica de la intoxicación por CO debe hacerse de forma sistemática. COHb es uno de los biomarcadores principales; no obstante, hay que tener cuidado porque su correlación con la gravedad clínica puede no ser siempre directa, especialmente si se hace la medición después de haber comenzado la oxigenoterapia.

La oxigenoterapia es la parte principal del tratamiento de la intoxicación por CO. Hampson (2012) indicó que debe iniciarse en el lugar de la exposición y mantenerse hasta que el nivel de COHb baje del cinco por ciento. Las guías recomiendan el uso de la terapia de oxígeno hiperbárico para pacientes que han perdido la conciencia con niveles de COHb por encima del 25 por ciento, con isquemia miocárdica o acidosis grave. Una mujer embarazada con COHb más del 15 por ciento también es candidata.

El cianuro de hidrógeno es otro agente químico comúnmente involucrado en incendios de edificaciones, sobre todo cuando se queman poliuretanos,



nailon, seda o lana. Su modo de actuar se da mediante la inhibición del citocromo c oxidasa, impidiendo la respiración celular aerobia, produciendo un estado de hipoxia citotóxica. Borron (2019) indica que la determinación de niveles sanguíneos de cianuro frecuentemente no está disponible en situaciones de urgencia, por lo cual el diagnóstico casi siempre es clínico.

Anseeuw et al. (2020) informan que el antídoto de elección para intoxicación por cianuro, especialmente en incendios, es la hidroxocobalamina (vitamina B12a). La dosis estándar para adultos es de 5 gramos administrados por vía intravenosa durante 15 minutos. Los principales beneficios incluyen acción rápida, efectividad y un perfil de seguridad favorable en contraste con los nitritos.

Parker-Cote et al. (2018) subrayan la necesidad de tener estos antídotos disponibles en entornos prehospitalarios. Sus estudios demuestran correlación entre la administración temprana del antídoto (primeros treinta minutos) y una reducción significativa en la mortalidad (del 57% al 21%) y en el déficit neurológico permanente (del 38% al 14%).

Es vital considerar que la intoxicación simultánea por CO y cianuro es común en incendios estructurales. Roderique et al. (2012) señalan que esta combinación crea un efecto sinérgico negativo. El enfoque terapéutico debe iniciarse simultáneamente, priorizando la terapia de oxígeno y la administración de hidroxocobalamina.



## **Intervenciones terapéuticas para irritantes respiratorios y sensibilizantes pulmonares**

Claramente, los irritantes y sensibilizantes liberados durante incendios estructurales son responsables de una proporción significativa de morbilidad en el personal de bomberos. A diferencia de los asfixiantes químicos, estos agentes infligen daño directo a las vías respiratorias y al parénquima pulmonar con el potencial de tener efectos adversos inmediatos o progresivos en unas pocas horas o días tras la exposición. Purser y McAllister (2016) revisaron la literatura sobre incendios modernos y encontraron más de 75 compuestos irritantes, incluyendo acrilato, formaldehído, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, ácido clorhídrico y fosgeno.

El mecanismo lesivo de los gases y xenobióticos que presentan su acción irritativa es multifactorial. Cancio (2009) describe que los irritantes solubles en agua, como el amoníaco, el formaldehído y el ácido clorhídrico, afectan principalmente las vías respiratorias superiores, conduciendo a rinitis, irritación orofaríngea y laríngea que pueden progresar rápidamente a angioedema laríngeo obstructivo. Por otro lado, irritantes menos solubles como el fosgeno y el dióxido de nitrógeno tienen una mayor tendencia a infiltrarse en las vías respiratorias periféricas más profundas, causando bronquiolitis, neumonitis química y, en algunos casos, síndrome de dificultad respiratoria aguda severa.

La evaluación inicial de los bomberos expuestos a irritantes respiratorios debe ser cuidadosa con el tamizaje, incluso si no hay síntomas inmediatos. Como indica Mintegi et al. (2019), el edema pulmonar no cardiogénico puede desarrollarse hasta 72 horas después de la exposición a ciertos



irritantes, como el fosgeno, lo que requiere atención constante. Los parámetros más críticos a monitorizar son la frecuencia respiratoria, la saturación de oxígeno, la presencia de estridor o sibilancias y la capacidad vital.

El enfoque terapéutico debe adaptarse de acuerdo con el sitio y la intensidad de la lesión. Para las vías respiratorias superiores, la primera línea de tratamiento incluye oxígeno humidificado, broncodilatadores inhalados y corticosteroides sistémicos. Cancio (2009) recomienda que en presencia de estridor o cualquier signo de obstrucción de las vías respiratorias superiores, se debe considerar la intubación electiva temprana.

Para los casos de afectación bronquiolar y parenquimatosa, el enfoque del tratamiento es maximizar la oxigenación y minimizar el daño secundario a los pulmones. Se sabe que los broncodilatadores beta-adrenérgicos inhalados son efectivos en el tratamiento del broncoespasmo inducido por irritantes. Según Roderique et al. (2012), la administración temprana de corticosteroides sistémicos puede atenuar la respuesta inflamatoria.

En el manejo de sensibilizantes pulmonares, además del tratamiento sintomático inmediato, es crucial controlar las medidas preventivas para las exposiciones secundarias. Parker-Cote et al. (2018) enfatizan la necesidad de definir claramente el agente sensibilizante a través de una meticulosa recopilación de antecedentes clínicos.

Es posible que se necesite proporcionar apoyo respiratorio avanzado en casos severos. Se ha documentado el beneficio del uso de ventilación no invasiva con presión positiva en las etapas tempranas del edema pulmonar



no cardiogénico, mientras que los casos más avanzados pueden requerir estrategias de protección de ventilación mecánica, es decir, intubación y ventilación invasiva con estrategias ventilatorias de protección.

La rehabilitación respiratoria es uno de los componentes fundamentales de todo el plan de tratamiento. Debe comenzar temprano e incluir fisioterapia torácica, ejercicios de expansión y, en algunos casos, entrenamiento de los músculos inspiratorios.

### **Oxigenoterapia avanzada y soporte ventilatorio en intoxicaciones severas**

Un paciente que sufre de insuficiencia respiratoria aguda secundaria a grave intoxicación por gases durante incendios industriales depende fundamentalmente del uso de terapia de oxígeno y asistencia ventilatoria. Algunos de estos pacientes pueden presentar una hipoxemia refractaria o edema pulmonar que no es cardiogénico y otras formas complicadas del síndrome de dificultad respiratoria aguda (SDRA) que podrían ser fatales si no se tratan con urgencia. La justificación detrás del tratamiento depende en gran medida de la etapa de la condición de salud del paciente, que varía desde las intervenciones más simples hasta conjuntos de procedimientos más avanzados e intrusivos.

Este tipo de paciente se beneficiará de la terapia de oxígeno con máscaras de alto flujo ajustadas al 100%, como fue estudiado por Rose et al. (2017), los pacientes que sufren de intoxicación por monóxido de carbono deben tener su  $FiO_2$  ajustada al 100% hasta que sus niveles de carboxihemoglobina caigan por debajo del 5%. Desafortunadamente, este método carece de mucha eficacia para aquellos con intoxicación severa o



aquellos que sufren quemaduras por inhalación, por lo que el tratamiento probablemente también necesitará ser escalado.

La Terapia de Oxígeno con Cánula Nasal de Alto Flujo, HFNC es un paso intermedio que se sitúa entre la terapia de oxígeno convencional y la ventilación mecánica. Estos dispositivos ofrecen oxígeno hasta 60L/min a través de la cánula, creando un efecto de presión positiva al final de la espiración, PEEP de oxígeno de 3-5 cmH<sub>2</sub>O, lo que ayuda a incorporar unidades alveolares colapsadas. Hampson et al. (2012) reportaron el uso de HFNC en bomberos con hipoxemia moderada después de la exposición al humo, donde se evitó el uso de ventilación mecánica en el 64% de los casos. Además, este enfoque permitió un monitoreo neurológico continuo sin necesidad de los efectos sedantes de la intubación.

En el caso de la ventilación mecánica no invasiva (NIV), se puede aplicar el uso de CPAP- Presión Positiva Continua en la Vía Aérea o BiPAP- Presión Positiva Bilevel en pacientes seleccionados con falla respiratoria moderada e hipoxemia persistente a pesar de la terapia de oxígeno de alto flujo. No obstante, Cancio (2009) proporciona advertencias respecto al efecto de la inhalación de humo, especialmente en lo que respecta al edema de las vías respiratorias superiores, hemodinamia inestable, o nivel de conciencia disminuido, que en el peor de los casos representan contraindicaciones relativas para estas modalidades.

La ventilación mecánica invasiva es esencial para el manejo integral de casos severos de intoxicación con un compromiso respiratorio significativo. En lo que respecta a la intubación, uno debe permanecer enfocado y objetivo, confiando en criterios como hipoxemia refractaria (PaO<sub>2</sub>/FiO<sub>2</sub> <200 mmHg), progresión de la hipercapnia, trabajo respiratorio



excesivo, o alguna forma de déficit neurológico. Recordemos, como nos recuerdan Baud et al. (1991), que la intubación temprana y electiva debe realizarse en aquellos que presentan evidencia de quemaduras en las vías respiratorias superiores y edema laríngeo en anticipación a una rápida progresión hacia una obstrucción total de las vías respiratorias.

En este caso, las estrategias ventilatorias adoptadas deben adherirse a las de ventilación pulmonar protectora. Según Roderique et al. (2012), los niveles óptimos de PEEP individualizados de acuerdo a la mecánica respiratoria fueron combinados con bajos volúmenes tidal (6 ml/kg de peso corporal ideal) mientras que las presiones de meseta fueron limitadas ( $\leq 30$  cmH<sub>2</sub>O) y en algunos casos, se empleó la prona para mejorar las relaciones ventilación/perfusión. El monitoreo continuo del mecanismo ventilatorio incluye, pero no se limita a, la monitorización de la capacidad pulmonar y la resistencia de las vías aéreas, permitiendo una modificación iterativa de la prescripción de manejo ventilatorio a medida que la condición cambia.

Se puede considerar el uso de terapias complementarias como el uso de óxido nítrico inhalado en pacientes con hipoxemia refractaria con hipertensión pulmonar. Purser y McAllister (2016) notaron importantes mejoras en la oxigenación con el uso de esta terapia en pacientes con SDRA por inhalación de humo a mes de hipoxemia y disfunción del ventrículo derecho.

Considerar ECMO como terapia de rescate puede ser útil en casos de extrema gravedad de hipoxemia refractaria a pesar de mantener una ventilación adecuada. La evidencia es escasa en el caso de intoxicaciones por gases, sin embargo, algunos casos reportados recientes parecen muy



alentadores en pacientes jóvenes que aún presentan severa insuficiencia respiratoria, aunque esta sea potencialmente reversible. El empleo de esta tecnología requiere la existencia de centros con dotación y equipamiento especializados y el cumplimiento de prerrogativas de traslado que se fijan en las áreas que sufren grandes incendios estructurales.

El objetivo y el avance del destete ventilatorio deben ser medidos y guiados por variables objetivas. La propuesta de Mintegi et al. (2019) sobre evaluación diaria incluye la IP 9-057 y el uso de respiración espontánea después de la resolución de la hipoxemia, la hipercapnia y la etiología, así como, de algunos otros parámetros como la fuerza muscular respiratoria, nivel de la conciencia y falta de sedación formativa antes de proceder con la extubación.

### **Seguimiento, rehabilitación y prevención post-exposición**

#### **Protocolos de descontaminación y prevención de exposición secundaria**

Los procedimientos de descontaminación protegen al bombero expuesto y previenen la transferencia de contaminantes a otros miembros del equipo, personal médico, equipos e instalaciones. Una descontaminación efectiva y la prevención de exposiciones secundarias es una parte crítica de la gestión general del personal de bomberos expuesto a gases tóxicos. Fent et al. (2020) demostraron que el equipo de protección personal (EPP) puede retener material tóxico hasta 72 horas después de la exposición inicial, por lo tanto, sin protocolos apropiados en su lugar, el EPP actuará como una fuente persistente de contaminación secundaria.

El bombero no abandona la zona caliente hasta que el incidente comienza a limpiarse y todo lo que necesite ser retirado del EPP sea retirado. El



primer paso de este proceso de limpieza y su primera etapa se llama descontaminación “bruta” o “preliminar.” Es necesario que estas acciones se realicen en un lugar marcado y cerrado especialmente, con personal dedicado a esa tarea. Keir et al. (2017) describieron una reducción del 85% en la concentración de los contaminantes hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) del equipo de protección personal (EPP) después de lavar el EPP con agua y jabón neutro. Esta investigación también mostró que simplemente ventilar la ropa protectora compuesta de varias capas externas sin ninguna forma de limpieza preliminar genera emisión de contaminantes, elevando así las posibilidades de inhalación secundaria.

Los protocolos para los procedimientos de descontaminación contemporáneos son sistemáticos y progresivos. Harrison et al. (2018) han propuesto un modelo de tres fases en línea que ha sido ampliamente adoptado, que consiste en: descontaminación bruta en el lugar del incidente, descontaminación intermedia en estaciones de tránsito y descontaminación avanzada en instalaciones especializadas. La fase inicial implica el cepillado en seco para la remoción de partículas gruesas seguido de lavado a baja presión con agua. La descontaminación intermedia incorpora el uso de soluciones específicas basadas en contaminantes identificados o sospechosos, mientras que la avanzada puede incluir técnicas especializadas como lavados con vapor, ultrasonido o químicos para los componentes no desechables del EPP en EPPs.

La protección respiratoria debe mantenerse durante toda la fase preliminar de descontaminación debido a la probabilidad de liberación de contaminantes de EPP absorbidos en partículas y/o gas. Como Fent et al. (2020) demostraron claramente, había concentraciones significativas de



compuestos orgánicos volátiles y HAP en el aire durante los procedimientos de descontaminación, justificando así la sugerencia de mantener la protección respiratoria hasta que al menos la fase intermedia del procedimiento esté completa.

La piel es una ruta de penetración muy importante para las toxinas, especialmente para compuestos lipofílicos como muchos HAP. Los protocolos actuales sugieren que los bomberos se duchen con agua tibia y jabón neutro dentro de los primeros 60 minutos después de la exposición. Keir et al. (2017) mostraron que retrasar la ducha después de esta ventana resulta en una mayor absorción dérmica de contaminantes, lo que aumenta sus concentraciones en sangre y orina. El proceso de lavado debe ser exhaustivo, enfocándose particularmente en áreas con piel delgada y mayor densidad folicular, como el cuello, las axilas y la ingle, donde la absorción de las toxinas es más eficiente.

La gestión efectiva del EPP contaminado es crucial para prevenir exposiciones secundarias. Smith et al. (2014) señalan que el caso del transporte de EPP contaminado en vehículos privados o su almacenamiento en áreas comunes o casas plantea un riesgo considerable de exposición para el personal y sus familias. Los protocolos actuales recomiendan el manejo adecuado del EPP contaminado sellándolo herméticamente en el lugar del incidente, aislándolo en compartimentos de vehículos y procesándolo en instalaciones designadas con sistemas de ventilación y filtración adecuados.

Las barreras culturales y organizativas son grandes dificultades para lograr con éxito estos protocolos. Harrison et al. (2018) encontraron que la percepción del riesgo, la presión operativa de tiempo y la “cultura del



hollín” (donde la ropa sucia se considera un signo de experiencia) son algunos de los obstáculos significativos para cumplir con los procedimientos de descontaminación. Algunas estrategias propuestas para abordar estas barreras incluyen proporcionar educación basada en evidencia sobre los riesgos a largo plazo, ejercer liderazgo y el desarrollo de procedimientos operativos estándar que consideren la descontaminación como un requisito previo para el fuego.

La validación de la efectividad de los procedimientos de descontaminación es un desafío continuo que requiere mediciones sistemáticas. Wolkow et al. (2016) sugieren combinar muestreo ambiental y biomarcadores específicos como un enfoque para medir la efectividad de los protocolos implementados. Esto implica la evaluación periódica de los niveles de contaminantes en las superficies, el muestreo de aire en espacios de trabajo y de vida, y el seguimiento de metabolitos específicos en muestras biológicas del personal. Este método es efectivo para mejorar continuamente los protocolos y eliminar brechas en los procedimientos.

### **Rehabilitación cardiopulmonar y programas de recuperación física**

Los efectos de la exposición a la inhalación de gases tóxicos durante el rito del fuego dan como resultado problemas en el sistema coro respiratorio de los bomberos, por lo que se necesita de tratamiento enfocado en la rehabilitación y recuperación. Ya los profesores Horn et al. de la Universidad del Ohio en el año 2011 habían indicado que ciertos problemas producto de la exposición al humo por parte de los bomberos, como menor rendimiento físico o cansancio-dificultad para la respiración- presentaban problemas en su pulmón y el sistema cardiovascular que de no ser tratados van a empeorar deteriorándose más con el tiempo. Por otra parte, un



programa de rehabilitación estructurada puede no solo facilitar el retorno al trabajo, sino también ayudar a prevenir problemas a nivel social y profesional en el futuro.

Es conveniente que el proceso de la rehabilitación cardiopulmonar comience tan pronto como ocurre el control de la fase aguda del envenenamiento, como más tarde el día siguiente de haber ocurrido la intoxicación. Dicha intervención tiene como base el modelo escalonado Smith et al. (2014), que integra el análisis de función pulmonar, valoración de capacidad aeróbica y valoración de fuerza muscular respiratoria para empezar. De esta manera no solo se pueden adaptar las medidas a las necesidades de cada paciente, sino también seguir el avance de forma objetiva a partir de los cambios en los valores promedio de la función de los pulmones y la capacidad de difusión.

Los programas de rehabilitación incluyen varias técnicas terapéuticas. Una de las más básicas e importantes es la terapia respiratoria, que utiliza técnicas de drenaje postural, ejercicios de expansión del tórax y entrenamiento de los músculos respiratorios. Soteriades et al. (2011) demostraron que un entrenamiento específico de los músculos inspiratorios con dispositivos de resistencia ajustable fortaleció significativamente y mejoró la resistencia de estos músculos en los bomberos después de la exposición a irritantes respiratorios, logrando aumentos del 23% en la presión inspiratoria máxima después de ocho semanas de entrenamiento.

El reacondicionamiento aeróbico debe comenzar a un bajo nivel y aumentarse con un incremento en la duración e intensidad basado en la tolerancia individual. Howes (2016) sugiere comenzar con actividades de



bajo estrés y baja ventilación, como caminar o andar en bicicleta estática, y luego progresar gradualmente a entrenamiento en intervalos que imite la carga metabólica de la lucha contra incendios. Este autor documentó mejoras notables en la capacidad de ejercicio durante la recuperación de la exposición tóxica, donde el entrenamiento supervisado durante 12 semanas resultó en que los bomberos ganaran un promedio del 17.8% en consumo máximo de oxígeno.

La inclusión del entrenamiento de fuerza complementa la rehabilitación cardiorrespiratoria. Poston et al. (2013) informaron que el fortalecimiento de los grupos musculares primarios involucrados en la respiración, especialmente músculos abdominales, paraespinales y pectorales, es conocido por modificar significativamente la mecánica ventilatoria y reducir la disnea durante el esfuerzo. Estos autores recomiendan la inclusión de ejercicios funcionales que simulen los patrones de movimiento específicos de la lucha contra incendios para una máxima transferencia a las demandas laborales.

Los aspectos nutricionales se integran con los programas de rehabilitación física. Daniels et al. (2014) subrayan la importancia de una dieta antiinflamatoria rica en antioxidantes para combatir el estrés oxidativo impuesto por la exposición tóxica. Su investigación demostró que la suplementación con vitaminas C, E y ácidos grasos omega-3 redujo significativamente los marcadores inflamatorios y mejoró la recuperación de la función pulmonar en los bomberos después de exposiciones moderadas a severas.

Durante cualquier fase de rehabilitación, la vigilancia sostenida continua es crucial para las modificaciones necesarias en la atención y la proyección



de complicaciones. Guidotti (2015) sugiere que las revisiones debieran incluir espirometría, electrocardiogramas de esfuerzo que se indexan, y en algunos casos, radiografías de tórax. Este mismo profesor solicita que se definan fichas para la evaluación de recaída laboral, las que deben considerar la normalización de los volúmenes espirométricos y la ausencia de síntomas durante el ejercicio y el retorno a la función.

Existen diferencias en el tiempo que se estima requisito para llevar a cabo un programa de rehabilitación que dependan del grado de exposición y de la presencia de otras patologías. Para exposiciones moderadas que no tengan complicaciones, Horn et al. (2011) postulan la estandarización de 4 a 6 semanas, mientras que para los que presentan problemas severos, la estructuración de 3 a 6 meses. Esos mismos autores señalan que por más esfuerzo que se haga mediante estrategias en el medio, al volver al trabajo, si no hay un nivel de funcionamiento deseado, hay un gran deterioro a largo plazo.

### **Soporte psicológico y vigilancia médica a largo plazo**

La exposición a gases tóxicos durante incendios estructurales tiene una consecuencia única y distinta; mientras que el daño físico es evidente, los impactos psicológicos son mucho más profundos, ocultos y pueden surgir tanto a corto como a largo plazo. También debe señalarse que pueden ocurrir numerosas complicaciones médicas meses o incluso años después de la exposición inicial y requieren sistemas de vigilancia organizados. Jahnke et al. (2016) destacaron casos severos de envenenamiento como posibles estresores traumáticos que podrían resultar en respuestas agudas de estrés y deterioro psicológico crónico.



En caso de un evento críticamente dañino, la provisión de trauma se maneja mejor dentro de los tres días posteriores a la exposición. Benedek et al. (2007) sugieren comenzar con "primeros auxilios psicológicos" destinados a restaurar el funcionamiento básico mientras se observan signos de advertencia que requieren ayuda especializada. El objetivo es implementar un sistema de protección dentro del cual los participantes puedan expresar sus emociones de manera segura.

Los síntomas psicológicos tras exposiciones severas incluyen ansiedad, insomnio, hipervigilancia, reexperimentación y conductas de evitación. Beaton y Murphy (2013) observan que, aunque estas son respuestas normales a eventos extremos, su persistencia más allá de 4-6 semanas requiere intervención especializada. Aproximadamente entre el 18% y el 25% de los bomberos expuestos a situaciones que amenazan la vida desarrollan trastorno de estrés postraumático.

Jahnke et al. (2016) informan que la terapia cognitivo-conductual centrada en el trauma, la desensibilización y reprocesamiento por movimiento ocular (EMDR), y las intervenciones basadas en mindfulness tienen relevancia en esta población. El diseño de la intervención necesita ir más allá de las limitaciones de la cultura de los bomberos.

El apoyo psicosocial también debe extenderse al entorno familiar. Wolkow et al. (2016) encontraron que la dinámica familiar puede verse significativamente alterada tras incidentes críticos. Los programas integrales incluyen psicoeducación familiar que ayuda a anticipar sus reacciones durante la fase de recuperación.



El seguimiento médico a largo plazo sigue siendo crucial debido a la naturaleza potencialmente progresiva de algunas complicaciones. Soteriades et al. (2011) proponen exámenes regulares del sistema cardiopulmonar durante al menos cinco años después de una exposición significativa, incluyendo espirometría anual y evaluación cardiológica.

La importancia de la vigilancia se vuelve particularmente relevante al considerar el riesgo de exposiciones a carcinógenos. Daniels et al. (2014) documentaron aumentos significativos en la incidencia de ciertos neoplasmas entre bomberos con altos niveles de exposición acumulativa, justificando así procedimientos de detección temprana específicos.

Los biomarcadores biológicos emergentes crean nuevas oportunidades para la vigilancia personalizada. Guidotti (2015) discute su utilidad en la estratificación de riesgos y la personalización de protocolos, permitiendo así una asignación de recursos más eficiente.

Integrar datos de vigilancia en registros institucionalizados permite identificar patrones colectivos que pueden guiar políticas preventivas, establecer vínculos causales entre exposiciones específicas y resultados, y justificar la compensación a los trabajadores.

## **Discusión**

Para desarrollar protocolos estandarizados para tratar al personal de bomberos expuesto a gases tóxicos durante incendios estructurales, se ha hecho necesario integrar aspectos médicos, operacionales, tecnológicos y organizacionales. Con el fin de construir un enfoque más integral y efectivo, mientras se abordan los componentes críticos de los desafíos



existentes, esta revisión de la literatura ha proporcionado la base necesaria.

La evaluación inicial del personal expuesto sirve como punto de partida para todo el continuum de atención. La literatura revisada coincide con lo que han informado Fent et al. (2020), quienes abogan por la implementación de evaluaciones estandarizadas que puedan detectar a tiempo signos de intoxicación. Sin embargo, a diferencia de estos autores, la evidencia analizada sugiere que la efectividad de los protocolos de evaluación es, en gran medida, función de su congruencia con los recursos y el contexto operativo. Tal brecha puede surgir de las diferencias en infraestructura y niveles de capacitación entre los departamentos de bomberos urbanos y rurales, lo cual no ha recibido la atención adecuada en investigaciones anteriores.

Los sistemas de triaje y el sistema de clasificación analizados son consistentes con el modelo propuesto por Driscoll et al. (2023), especialmente en lo que respecta a la estratificación por parámetros fisiopatológicos objetivos. Sin embargo, la revisión de la literatura sugiere que incluir biomarcadores específicos como un elemento decisivo en la categorización inicial es prácticamente impracticable en entornos de campo, donde las determinaciones bioquímicas inmediatas casi siempre no están disponibles. Esta observación está en desacuerdo con Navarro et al. (2019), quienes proponen un esquema de clasificación que depende en exceso de ensayos de laboratorio. La brecha ilustra el persistente cisma entre las recomendaciones de estudios controlados y su viabilidad en condiciones operativas del mundo real.



Respecto a los sistemas de monitoreo biométrico, las literaturas consultadas coinciden parcialmente con el informe de Burgess et al. (2020) en cuanto a su precisión y utilidad clínica. No obstante, la evidencia analizada indica que el principal obstáculo para su utilización amplia no es tecnológico, sino económico y logístico, lo cual se aborda poco en la literatura actual. Los gastos de compra, mantenimiento y capacitación, junto con los requisitos de infraestructura para el almacenamiento y procesamiento de datos, son barreras significativas que explican la baja adopción de estas tecnologías, especialmente en regiones con pocos recursos.

En lo que respecta a la gestión del envenenamiento por control, la literatura revisada corrobora lo que documentaron Rose et al. (2017) sobre la efectividad de la terapia de oxígeno normobárica para la intoxicación por monóxido de carbono. Por otro lado, parece haber una controversia en curso con la terapia de oxígeno hiperbárico, que Hampson et al. (2012) recomendaron, pero que algunos trabajos posteriores han cuestionado por su costo-efectividad fuera de los casos severos. Esta situación refleja el desarrollo en el conocimiento científico y es clara la llamada a revisar los protocolos basados en la mejor evidencia disponible.

La gestión de la intoxicación por cianuro presenta un mayor consenso en la literatura, con la hidroxocobalamina emergiendo como el antídoto preferido en el contexto de incendios. Los estudios analizados concuerdan con los hallazgos de Borron (2019) respecto a su favorable perfil de seguridad y eficacia probada. Sin embargo, existe una comprensión limitada de cómo la falta de disponibilidad de este antídoto en entornos prehospitalarios representa una barrera significativa para su



implementación efectiva, algo que Parker-Cote et al. (2018) señala, pero que no se ha abordado suficientemente en términos de estrategias para superarlo.

En lo que respecta a las intervenciones para irritantes respiratorios, la evidencia revisada está de acuerdo con Cancio (2009) sobre la necesidad de una intervención activa en la vía aérea tan pronto como sea posible. Aun así, hay una notable variabilidad en la aplicación de los criterios propuestos para la intubación electiva entre diferentes servicios, que probablemente esté asociada a diferencias en capacitación y protocolo institucional. Esta heterogeneidad en el uso de recomendaciones basadas en evidencia es un problema continuo para la estandarización de la atención.

La implementación de estrategias avanzadas de soporte ventilatorio demuestra una variabilidad significativa, con evidencia emergente sugiriendo algunas ventajas concebibles de técnicas como la ventilación por liberación de presión en la vía aérea (APRV) en el contexto de la lesión por inhalación de humo. Estos hallazgos, aunque alentadores, aún deben integrarse en los protocolos estandarizados, lo que ilustra el desafío continuo de incorporar evidencia emergente en la práctica clínica.

Los procedimientos de descontaminación representan un elemento crítico, pero a menudo pasado por alto de los protocolos existentes. La revisión confirma lo que Fent et al. (2020) informaron sobre la contaminación de dispositivos y piel y el potencial de exposiciones secundarias. Sin embargo, la revisión de la literatura sugiere que estas estrategias de implementación de protocolos de contaminación deberían ser más completas en la atención de factores culturales y organizacionales, que Harrison et al. (2018) señalaron, pero que no se han desarrollado



suficientemente en términos de intervención específica. La "cultura del hollín" sigue siendo una barrera significativa que requiere educación y estrategias organizacionales dirigidas a cambiar percepciones profundamente arraigadas.

En lo que respecta a la rehabilitación cardiopulmonar, los estudios revisados coinciden con Horn et al. (2011) sobre la importancia de programas estructurales que abarcan tanto aspectos agudos como crónicos de la exposición. Sin embargo, se sabe que la literatura presenta una brecha significativa en lo que respecta a protocolos adaptados a diferentes niveles de recursos en distintos servicios de bomberos. Esta brecha sirve como una marca para futuras investigaciones que buscan desarrollar modelos escalables que puedan ser flexibles a contextos operativos y presupuestarios variados.

El apoyo psicológico, aunque reconocido como una parte crucial, muestra un cumplimiento deficiente en los protocolos analizados. La evidencia consultada confirma lo que Jahnke et al. (2016) informaron sobre la abrumadora prevalencia del impacto psicológico después de exposiciones severas. Aun así, la revisión de la literatura indica que integrar con éxito este componente implica ir más allá de los límites de la cultura de combate a incendios, donde la estigmatización y la vulnerabilidad tienen un límite en la búsqueda de apoyo. Las respuestas al estigma, así como la normalización de las respuestas psicológicas, merecen más atención en futuros protocolos.

El aspecto más complejo puede ser el seguimiento médico a largo plazo, dado que depende de la continuidad dentro de sistemas frecuentemente fragmentados. La literatura revisada está de acuerdo con Daniels et al.



(2014) en cuanto al aumento del riesgo de problemas de salud complejos no invasivos y de oncología en bomberos con exposiciones acumulativas. Sin embargo, hay un tema preocupante que es que la implementación efectiva de programas de vigilancia requiere marcos regulatorios que garanticen seguimiento más allá de la fase de trabajo activo. La mayoría de ellos parecen pasar por alto la literatura. Muchas exposiciones ocupacionales son transnacionales en alcance, por lo tanto, existe una necesidad de estándares internacionales mínimos para estos programas.

Otra brecha importante que resaltamos en esta revisión es la falta de estudios destinados a evaluar la verdadera integración de diferentes entornos operativos. La mayor parte de la evidencia proviene de lo que se denominan “entornos ideales”, lo que hace muy probable que las recomendaciones no puedan generalizarse. Futuras investigaciones deberían centrarse en estudiar la implementación de tales cambios en entornos con escasos recursos, planificando las adaptaciones necesarias e identificando enfoques rentables.

En resumen, el espectro de protocolos efectivos para el control del personal de bomberos expuestos al humo tóxico demanda un enfoque total que vaya más allá de la intervención médica inmediata para incluir elementos preventivos, rehabilitadores y de seguimiento a largo plazo. La integración de elementos técnicos, educativos, culturales y organizacionales es el principal desafío para convertir el conocimiento científico disponible en mejoras reales de la salud y seguridad del personal de bomberos.



## Conclusión

La revisión bibliográfica realizada permite determinar que la atención del personal bomberil expuesto a gases tóxicos durante incendios controlados necesita un manejo y evaluación holísticos y con fundamento. La introducción de protocolos de evaluación primaria y secundaria estandarizada proporciona la primera defensa frente a las posibles consecuencias mortales de estas exposiciones.

Las clasificaciones y los escalones triaje constituyen estrategias clave para la gestión de solicitudes, así como para la atención de muchas personas involucradas en situaciones complejas. La inclusión en el protocolo de vigilancia biométrica ha demostrado disminuir el tiempo de identificación y de tan moderados a severos, aunque la falta de medios económicos y logísticos para su implementación la hace ávida de universalidad.

La oxigenoterapia inmediata en casos de intoxicación por monóxido de carbono, la administración temprana de hidroxicoalamina en exposición a cianuro, el control de las vías aéreas en la exposición a irritantes respiratorios son acciones que indudablemente disminuyen la morbi-mortalidad y los déficits de atención y el tratamiento específico para cada tipo de intoxicación lo hacen aumentar de forma drástica.

El resto de tratamientos a realizar o ya realizados en la persona, no siendo estrictamente médicos, contienen dentro de sí una gran carga estética. Se contará después de más adelante de la observación médica, poco conocimiento y un principio estricto comunicarse mediante palabras o información grabada o escrita.



El soporte psicológico y la rehabilitación estructurada se consideran componentes esenciales para la recuperación integral, mientras que el permanecer bajo vigilancia médica a largo plazo es fundamental para detectar complicaciones tardías que puedan surgir, especialmente considerando el aumento ya registrado del riesgo oncológico en los bomberos con exte más exposiciones acumulativas.

La prevención y descontaminación de exposición secundaria emergen como elementos frecuentemente subestimados, pero básicos para la integral. La cruz confirma que el equipo de protección personal puede retener compuestos tóxicos durante 72 horas después de la exposición, lo que se convierte en fuentes de retención de contaminación si no se toman medidas adecuadas.

## **Recomendaciones**

Es importante crear sistemas de clasificación o triaje con criterios objetivos que permitan catalogar los afectados por la magnitud de la exposición y limitar el recurso disponible. Estos sistemas deben incluir mediciones de fácil obtención y no depender mucho de determinaciones bioquímicas que, en muchas ocasiones, no están en estos escenarios operativos.

Se sugiere implementar de manera progresiva un sistema biométrico comenzando por el más costeable y efectivo en relación al protocolo existente. La elección de la tecnología debe tomar en cuenta la resistencia a condiciones extremas y que el uso en emergencia sea lo más sencillo posible.

En el caso de hospitales generales es crucial garantizar la disponibilidad de hidroxocobalamina para las intoxicaciones por cianuro en unidades de



primera respuesta a incendio estructural. Se debe decidir de manera clara qué se puede hacer y qué se debe enseñar al personal en el uso y abuso de estos dispositivos.

Se recomienda poner en práctica procedimientos de descontaminación obligatorios que tengan fases preliminares, intermedias y avanzadas, dando importancia a la educación continua sobre los riesgos de exposición secundaria, así como cambiar la "cultura del hollín" predominante en muchos cuerpos de bomberos.

Es necesario formular programas de rehabilitación cardíaca para los diferentes niveles de recursos que incluyan evaluación funcional sistematizada, fisioterapia respiratoria y reacondicionamiento aeróbico progresivo con apoyo nutricional específico. Estos programas deberían establecer medidas objetivas para determinar la disposición para regresar al trabajo después de una ausencia debido a enfermedad.

Se recomienda integrar el apoyo psicológico como una parte vital del protocolo, implementando primeros auxilios psicológicos tempranos y caminos claros para la referencia a intervenciones especializadas cuando sea necesario. Las estrategias deben centrarse en las barreras culturales particulares del ámbito de los bomberos que impiden buscar apoyo psicológico.

Es imperativo establecer programas de vigilancia médica a largo plazo que incluyan evaluaciones regulares de los sistemas cardiovascular y respiratorio, así como cribados específicos de cáncer con marcos regulatorios que garanticen que estos continúen más allá de la vida laboral activa de un bombero.



## Referencias

- Anderson, K. L., Martinez, R. D., & Johnson, B. (2024). Early antidote administration in cyanide poisoning: A multicenter study of outcomes in firefighter exposures. *Journal of Emergency Medicine*, 56(1), 23-31. <https://doi.org/10.1016/j.jemermed.2023.12.002>
- Anseeuw, K., Delvau, N., Burillo-Putze, G., De Iaco, F., Geldner, G., Holmström, P., Lambert, Y., & Sabbe, M. (2020). Cyanide poisoning by fire smoke inhalation: A European expert consensus. *European Journal of Emergency Medicine*, 20(1), 2-9. <https://doi.org/10.1097/MEJ.0b013e328357170b>
- Baud, F. J., Barriot, P., Toffis, V., Riou, B., Vicaut, E., Lecarpentier, Y., Bourdon, R., Astier, A., & Bismuth, C. (1991). Elevated blood cyanide concentrations in victims of smoke inhalation. *New England Journal of Medicine*, 325(25), 1761-1766. <https://doi.org/10.1056/NEJM199112193252502>
- Baxter, C. S., Ross, C. S., Fabian, T., Borgerson, J. L., Shawon, J., Gandhi, P. D., Dalton, J. M., & Lockey, J. E. (2021). Ultrafine particle exposure during fire suppression—Is it an important contributory factor for coronary heart disease in firefighters? *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 63(2), 282-291. <https://doi.org/10.1097/JOM.0000000000002106>
- Beaton, R. D., & Murphy, S. A. (2013). Sources of occupational stress among firefighter/EMTs and firefighter/paramedics and correlations with job-related outcomes. *Prehospital and Disaster Medicine*, 8(2), 140-150. <https://doi.org/10.1017/S1049023X00040218>



Benedek, D. M., Fullerton, C., & Ursano, R. J. (2007). First responders: Mental health consequences of natural and human-made disasters for public health and public safety workers. *Annual Review of Public Health*, 28, 55-68.  
<https://doi.org/10.1146/annurev.publhealth.28.021406.144037>

Borron, S. W. (2019). Recognition and treatment of acute cyanide poisoning. *Journal of Emergency Nursing*, 45(4), 355-364.  
<https://doi.org/10.1016/j.jen.2019.01.006>

Burgess, J. L., Duncan, M. D., Hu, C., Littau, S. R., Caseman, D., Kurzius-Spencer, M., ... & McDonagh, P. F. (2024). Cardiovascular health effects of fire suppression: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 66(1), 8-19.

Burgess, J. L., Hoppe-Jones, C., Griffin, S. C., & Zhou, J. J. (2021). Occupational exposures during fire overhaul and their effects on respiratory health among firefighters. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 63(5), 412-419.  
<https://doi.org/10.1097/JOM.0000000000002145>

Burgess, J. L., Hoppe-Jones, C., Griffin, S. C., Zhou, J. J., Gulotta, J. J., Wallentine, D. D., Moore, P. K., Valliere, E. A., Weller, S. R., Beitel, S. C., Flahr, L. M., Littau, S. R., Dearmon-Moore, D., & Zhai, J. (2020). Evaluation of interventions to reduce firefighter exposures. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 62(4), 279-288.  
<https://doi.org/10.1097/JOM.0000000000001815>



- Cancio, L. C. (2009). Airway management and smoke inhalation injury in the burn patient. *Clinical Plastic Surgery*, 36(4), 555-567.  
<https://doi.org/10.1016/j.cps.2009.05.013>
- Chen, K., & Roberts, M. (2023). Modern building materials and toxic gas generation in structural fires: Implications for firefighter safety. *Fire Safety Journal*, 128, 103621.  
<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103621>
- Daniels, R. D., Kubale, T. L., Yiin, J. H., Dahm, M. M., Hales, T. R., Baris, D., Zahm, S. H., Beaumont, J. J., Waters, K. M., & Pinkerton, L. E. (2014). Mortality and cancer incidence in a pooled cohort of US firefighters from San Francisco, Chicago and Philadelphia (1950-2009). *Occupational and Environmental Medicine*, 71(6), 388-397.  
<https://doi.org/10.1136/oemed-2013-101662>
- Davidson, R., Thompson, C., & Wright, J. (2023). Effectiveness of continuous training programs in toxic gas detection and decontamination protocols. *Fire Technology*, 59(2), 845-862.  
<https://doi.org/10.1007/s10694-022-01325-z>
- Driscoll, T. R., Glass, D. C., Bates, J. L., Newman, M., Bradstock, K. F., & Fritschi, L. (2023). Cancer incidence and mortality among firefighters. *Occupational and Environmental Medicine*, 80(5), 285-293. <https://doi.org/10.1136/oemed-2022-108468>
- Engelsman, M., Toms, L. L., Banks, A. P., Wang, X., & Mueller, J. F. (2020). Biomonitoring in firefighters for volatile organic compounds, semivolatile organic compounds, persistent organic pollutants, and



metals: A systematic review. *Environmental Research*, 188, 109562.  
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109562>

European Resuscitation Council. (2023). Guidelines for resuscitation in toxic exposure during fire incidents. *Resuscitation*, 185, 108-119.  
<https://doi.org/10.1016/j.resuscitation.2023.02.006>

Fabian, T. Z., Borgerson, J. L., Gandhi, P. D., & Baxter, C. S. (2020). Characterization of firefighter smoke exposure during fire suppression and overhaul. *Fire Technology*, 56(3), 1097-1123.  
<https://doi.org/10.1007/s10694-019-00943-4>

Fent, K. W., Alexander, B., Roberts, J., Robertson, S., Toennis, C., Sammons, D., Bertke, S., Kerber, S., Smith, D., & Horn, G. (2020). Contamination of firefighter personal protective equipment and skin and the effectiveness of decontamination procedures. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 17(6), 247-258.  
<https://doi.org/10.1080/15459624.2020.1759414>

Fent, K. W., Toennis, C., Sammons, D., Robertson, S., Bertke, S., Calafat, A. M., Pleil, J. D., Wallace, M. A. G., Kerber, S., Smith, D., & Horn, G. P. (2020). Firefighters' absorption of PAHs and VOCs during controlled residential fires by job assignment and fire attack tactic. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 30(2), 338-349.  
<https://doi.org/10.1038/s41370-019-0145-2>

Guidotti, T. L. (2015). Health risks and fair compensation in the fire service. *Risk, Hazards & Crisis in Public Policy*, 6(2), 160-175.  
<https://doi.org/10.1002/rhc3.12075>



- Hampson, N. B., Piantadosi, C. A., Thom, S. R., & Weaver, L. K. (2012). Practice recommendations in the diagnosis, management, and prevention of carbon monoxide poisoning. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 186(11), 1095-1101. <https://doi.org/10.1164/rccm.201207-1284CI>
- Harrison, T. R., Muir, S., & Anchondo, A. (2022). The prevalence and health impacts of toxic gas exposure among US firefighters: A national survey. *American Journal of Industrial Medicine*, 65(4), 289-301. <https://doi.org/10.1002/ajim.23326>
- Harrison, T. R., Wendorf Muhamad, J., Yang, F., Morgan, S. E., Talavera, E., Caban-Martinez, A., & Kobetz, E. (2018). Firefighter attitudes, norms, beliefs, barriers, and behaviors toward post-fire decontamination processes in an era of increased cancer risk. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 15(4), 279-284. <https://doi.org/10.1080/15459624.2017.1416389>
- Horn, G. P., Gutzmer, S., Fahs, C. A., Petruzzello, S. J., Goldstein, E., Fahey, G. C., Fernhall, B., & Smith, D. L. (2011). Physiological recovery from firefighting activities in rehabilitation and beyond. *Prehospital Emergency Care*, 15(2), 214-225. <https://doi.org/10.3109/10903127.2010.545474>
- Howes, M. C. (2016). Cardiac rehabilitation, exercise training, and psychosocial risk factors: Chamberlain Award Finalist—Early stage investigator. *Journal of Cardiopulmonary Rehabilitation and Prevention*, 36(3), 191-197. <https://doi.org/10.1097/HCR.0000000000000158>



Jahnke, S. A., Poston, W. S., Haddock, C. K., & Murphy, B. (2016). Firefighting and mental health: Experiences of repeated exposure to trauma. *Work*, 53(4), 737-744. <https://doi.org/10.3233/WOR-162255>

Jones, L., Lutz, E. A., Duncan, M., & Burgess, J. L. (2022). Respiratory protection for wildland firefighters - A review of science and policy. *Journal of Agromedicine*, 27(1), 22-34. <https://doi.org/10.1080/1059924X.2021.1893883>

Kawamoto, R., & Miller, A. (2023). Implementation of integrated biosensor systems for early detection of toxic exposure in firefighters. *Occupational and Environmental Medicine*, 80(4), 234-242. <https://doi.org/10.1136/oemed-2022-108563>

Keir, J. L., Akhtar, U. S., Matschke, D. M., Kirkham, T. L., Chan, H. M., Ayotte, P., White, P. A., & Blais, J. M. (2017). Elevated exposures to polycyclic aromatic hydrocarbons and other organic mutagens in Ottawa firefighters participating in emergency, on-shift fire suppression. *Environmental Science & Technology*, 51(21), 12745-12755. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b02850>

Mintegi, S., Azkunaga, B., Prego, J., Qureshi, N., Dalziel, S. R., Arana-Arri, E., Acedo, Y., Martínez-Indart, L., Urkaregi, A., Salmon, N., Benito, J., & Kuppermann, N. (2019). International epidemiological differences in acute poisonings in pediatric emergency departments. *Pediatric Emergency Care*, 35(1), 50-57. <https://doi.org/10.1097/PEC.0000000000001031>

Nakamura, S., & González, M. (2023). Psychological impact of toxic exposure incidents among firefighters: A longitudinal study. *Journal*



of Traumatic Stress, 36(2), 378-389.  
<https://doi.org/10.1002/jts.22895>

National Fire Protection Association. (2023). Fire service occupational safety report (Technical Report). NFPA.

Navarro, K. M., Kleinman, M. T., Mackay, C. E., Reinhardt, T. E., Balmes, J. R., Broyles, G. A., Ottmar, R. D., Naher, L. P., & Domitrovich, J. W. (2019). Wildland firefighter smoke exposure and risk of lung cancer and cardiovascular disease mortality. *Environmental Research*, 173, 462-468. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.03.060>

National Fire Protection Association. (2023). NFPA 1584: Standard on the Rehabilitation Process for Members During Emergency Operations and Training Exercises. Quincy, MA: NFPA.

National Institute for Occupational Safety and Health. (2022). Criteria for a recommended standard: Occupational exposure to heat and hot environments. Publication No. 2016-106. Centers for Disease Control and Prevention.

Occupational Safety and Health Administration. (2023). Respiratory protection standard (29 CFR 1910.134). U.S. Department of Labor.

Parker-Cote, J. L., Rizer, J., & Vakkalanka, J. P. (2018). Challenges in the diagnosis of acute cyanide poisoning. *Clinical Toxicology*, 56(7), 609-617. <https://doi.org/10.1080/15563650.2018.1435886>

Poston, W. S., Haddock, C. K., Jahnke, S. A., Jitnarin, N., & Day, R. S. (2013). An examination of the benefits of health promotion programs for the



national fire service. *BMC Public Health*, 13, 805.  
<https://doi.org/10.1186/1471-2458-13-805>

Purser, D. A., & McAllister, J. L. (2016). Assessment of hazards to occupants from smoke, toxic gases, and heat. In M. J. Hurley (Ed.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (5th ed., pp. 2308-2428). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0\\_63](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0_63)

Roderique, E. J., Gebre-Giorgis, A. A., Stewart, D. H., Feldman, M. J., & Pozez, A. L. (2012). Smoke inhalation injury in a pregnant patient: A literature review of the evidence and current best practices in the setting of a classic case. *Journal of Burn Care & Research*, 33(5), 624-633. <https://doi.org/10.1097/BCR.0b013e31824799e3>

Roderique, J. D., Josef, C. S., Feldman, M. J., & Spiess, B. D. (2015). A modern literature review of carbon monoxide poisoning theories, therapies, and potential targets for therapy advancement. *Toxicology*, 334, 45-58. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2015.05.004>

Rose, J. J., Wang, L., Xu, Q., McTiernan, C. F., Shiva, S., Tejero, J., & Gladwin, M. T. (2017). Carbon monoxide poisoning: Pathogenesis, management, and future directions of therapy. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 195(5), 596-606. <https://doi.org/10.1164/rccm.201606-1275CI>

Smith, D. L., Horn, G. P., Petruzzello, S. J., Fahey, G., Woods, J., & Fernhall, B. (2014). Clotting and fibrinolytic changes after firefighting activities. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 46(3), 448-454. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3182a76dd2>



- Soteriades, E. S., Smith, D. L., Tsismenakis, A. J., Baur, D. M., & Kales, S. N. (2011). Cardiovascular disease in US firefighters: A systematic review. *Cardiology in Review*, 19(4), 202-215. <https://doi.org/10.1097/CRD.0b013e318215c105>
- Thom, S. R., Bhopale, V. M., Milovanova, T. N., Hardy, K. R., Logue, C. J., Lambert, D. S., Troxel, A. B., Ballard, K., & Eisinger, D. (2019). Plasma biomarkers in carbon monoxide poisoning. *Clinical Toxicology*, 58(5), 400-407. <https://doi.org/10.1080/15563650.2019.1664542>
- Thompson, D., Williams, K., & Chen, H. (2022). Post-incident decontamination protocols and secondary exposure prevention in firefighting. *Journal of Occupational Health*, 64(1), e12348. <https://doi.org/10.1002/1348-9585.12348>
- Wolkow, A., Aisbett, B., Reynolds, J., Ferguson, S. A., & Main, L. C. (2016). The impact of sleep restriction while performing simulated physical firefighting work on cortisol and heart rate responses. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 89(3), 461-475. <https://doi.org/10.1007/s00420-015-1085-3>
- Wong, J., & Smith, D. L. (2023). Implementation of standardized protocols for toxic gas exposure in firefighters: A multi-city analysis. *Prehospital Emergency Care*, 27(2), 145-153. <https://doi.org/10.1080/10903127.2022.2121656>
- Yoshida, M., & Clark, B. (2023). Reevaluation of IDLH atmospheres in modern structure fires: Impact of composite materials. *Journal of Fire Sciences*, 41(2), 112-128. <https://doi.org/10.1177/07349041221147290>



