



Análisis del riesgo por exposición a contaminantes tóxicos en el personal operativo del Cuerpo de Bomberos Ibarra durante incendios estructurales en viviendas urbanas.

Risk analysis of exposure to toxic contaminants among operational personnel of the Ibarra Fire Department during structural fires in urban homes.

Diego Andrés Loyo Caicedo¹ 

daloyo@itsoriente.edu.ec.

Instituto Superior Tecnológico Oriente (ITSO)

Riobamba, Ecuador

Benjamín Gabriel Quito Cortez² 

benjaminquito@bqc.com.ec

Instituto Superior Tecnológico Oriente (ITSO)

Riobamba, Ecuador

Daniela Fernanda Vásquez Duchicela³ 

danielavasquez@bqc.com.ec

Instituto Superior Tecnológico Oriente (ITSO)

Riobamba, Ecuador

Recepción: 05-01-2026

Aceptación: 09-02-2026

Publicación: 30-03-2026

Como citar este artículo: Loyo, D. Quito, B. Vásquez, D. (2026). **Análisis del riesgo por exposición a contaminantes tóxicos en el personal operativo del Cuerpo de Bomberos Ibarra durante incendios estructurales en viviendas urbanas.** *Metrópolis. Revista de Estudios Globales Universitarios*, 7 (1), pp. 1912-1961.

¹ Ingeniero Automotriz (ESPE); Tecnólogo en seguridad y salud ocupacional. Instituto Superior Tecnológico Oriente (ITSO); Maestrante en Herramientas de Seguridad Industrial y Salud en el Trabajo. (ITSO); Capitán del Cuerpo de Bomberos de Ibarra con amplia experiencia en respuesta a emergencias, gestión de riesgos y liderazgo operativo.

² Abogado, Magister en Educación (Universidad Bicentennial 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.

³ Ingeniera Mecánica mención Automotriz (Universidad Tecnológica América), Magister en Talento Humano (Universidad Internacional SEK), Magister en Administración de Empresas (Universidad Internacional del Ecuador), Doctor en Ciencias de la Educación PHD por la Universidad Bicentennial de Aragua, Venezuela.





Resumen

El personal operativo del Cuerpo de Bomberos Ibarra enfrenta un alto nivel de riesgo durante las intervenciones en incendios estructurales, debido a la exposición constante a contaminantes tóxicos presentes en el humo y los gases de combustión. El presente trabajo de investigación analiza el riesgo de exposición a dichas sustancias en los bomberos del cantón Ibarra, durante incendios estructurales en viviendas urbanas, con el fin de determinar los factores más críticos que afectan su salud ocupacional. A través de un enfoque descriptivo y analítico, se recopilaron datos sobre frecuencia de exposición, uso de equipos de protección respiratoria, condiciones ambientales y síntomas asociados a la inhalación de compuestos nocivos. Los resultados evidencian que la insuficiente utilización de equipos de protección y la prolongada permanencia en zonas de alta concentración de humo incrementan significativamente la probabilidad de afecciones respiratorias, dérmicas y cardiovasculares. Además, se identificó la necesidad de fortalecer los protocolos de seguridad y la capacitación en manejo de emergencias químicas, la falta de mantenimiento y renovación periódica de los equipos de protección individual agrava los riesgos asociados, ya que reduce su eficacia frente a la filtración de gases tóxicos y partículas finas. La presente investigación destaca la importancia de aplicar estrategias preventivas orientadas a la inspección técnica y reposición oportuna del equipamiento especializado, implementar políticas institucionales y programas de monitoreo biológico que salvaguarden la integridad física del personal operativo, asegurando una respuesta eficaz y segura frente a emergencias estructurales urbanas. **Palabras clave:** exposición ocupacional, contaminantes tóxicos, bomberos, incendios estructurales, salud laboral.

Abstract

Operational personnel of the Ibarra Fire Department face a high level of risk during interventions in structural fires due to constant exposure to toxic contaminants present in smoke and combustion gases. This research analyzes the risk of exposure to these substances among firefighters in the Ibarra canton during structural fires in urban dwellings, with the aim of identifying the most critical factors affecting their occupational health. Through a descriptive and analytical approach, data were collected on exposure frequency, use of respiratory protective equipment, environmental conditions, and symptoms associated with the inhalation of harmful compounds. The results show that insufficient use of protective equipment and prolonged presence in areas with high smoke concentration significantly increase the likelihood of respiratory, dermal, and cardiovascular disorders. Furthermore, the study identified the need to strengthen safety protocols and training in chemical emergency management. The lack of maintenance and periodic replacement of personal protective equipment aggravates associated risks, as it reduces the equipment's effectiveness against the infiltration of toxic gases and fine particles. This research highlights the importance of implementing preventive strategies focused on technical inspection and timely replacement of specialized equipment, as well as the development of institutional policies and biological monitoring programs that safeguard the physical integrity of operational personnel, ensuring an effective and safe response to urban structural emergencies. **Keywords:** occupational exposure, toxic contaminants, firefighters, structural fires, occupational health.





Introducción.

La exposición ocupacional a contaminantes tóxicos en incendios estructurales constituye un riesgo significativo para la salud de los bomberos, dado que en estos eventos se liberan gases y partículas derivados de la combustión de materiales sintéticos, maderas tratadas, plásticos y otros componentes presentes en construcciones modernas. Estas sustancias incluyen monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs), partículas finas (PM2.5, PM10) y otros compuestos irritantes o carcinogénicos que pueden inducir efectos agudos como irritación respiratoria y bronquitis, así como consecuencias a largo plazo, tales como enfermedad pulmonar obstructiva y tumores (Barbosa, 2022, p. 67; Hwang, 2021, p. 31; Navarro, 2019, pp. 39-41).

En la provincia de Imbabura y particularmente en la ciudad de Ibarra, no existen suficientes estudios locales que cuantifiquen este riesgo en el personal operativo del Cuerpo de Bomberos durante incendios estructurales en viviendas urbanas. Esto genera una brecha de conocimiento en cuanto a la frecuencia de exposición, los niveles reales de contaminantes, la eficacia del uso de equipos de protección individual (EPI) y la manifestación de síntomas relacionados con la salud respiratoria, dérmica y cardiovascular. El problema de investigación que guía este estudio es: ¿Cuál es el nivel de riesgo asociado con la exposición a contaminantes tóxicos en el personal operativo del Cuerpo de Bomberos de Ibarra durante incendios estructurales en viviendas urbanas, y qué factores contribuyen a ese riesgo?





Para abordar esta pregunta, el presente trabajo de esta investigación empleará un diseño cuantitativo, descriptivo-analítico. Se recolectarán datos mediante muestreo del personal operativo del Cuerpo de Bomberos de Ibarra que interviene en incendios estructurales. Las variables incluirán la frecuencia y duración de exposiciones, la medición de contaminantes en aire (por ejemplo, niveles de PM2.5, PAHs, CO), la utilización real de equipos de protección respiratoria, condiciones ambientales (temperatura, ventilación), y síntomas clínicos autoinformados y parámetros de salud que se obtienen mediante encuestas estructuradas y exámenes médicos simples (función pulmonar). Se analizarán asociaciones mediante estadística descriptiva y analítica (regresión, correlaciones), para identificar los factores más determinantes del riesgo. A pesar de la disponibilidad de equipos de protección respiratoria y trajes estructurales, diversos factores como la fatiga, el desgaste del equipamiento, la permanencia prolongada en zonas de combustión y el uso inadecuado de los dispositivos de seguridad aumentan la probabilidad de exposición a sustancias peligrosas

Los resultados permitirán generar recomendaciones específicas para mejorar la protección del personal operativo, optimizar prácticas de intervención en incendios, y contribuir al cuerpo de evidencia en salud ocupacional de bomberos, particularmente en contextos urbanos del cantón demostrando que la comprensión del riesgo local es esencial para diseñar políticas de prevención y protocolos de seguridad más eficaces.

Marco Teórico.

La exposición ocupacional se define como el contacto directo o indirecto de un trabajador con agentes físicos, químicos o biológicos durante el





desarrollo de sus labores y que puede desencadenar efectos adversos en la salud. En referencia a los incendios estructurales, los agentes químicos predominantes son hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs), material particulado (PM2.5/PM10), monóxido de carbono (CO) y compuestos orgánicos volátiles (COV), los cuales se generan por la combustión incompleta de materiales sintéticos, maderas tratadas y mobiliario doméstico. La entrada de estos agentes al organismo ocurre por inhalación, absorción dérmica y, en menor medida, ingestión secundaria, provocando efectos agudos (irritación respiratoria, disminución transitoria de la función pulmonar) y potenciales efectos crónicos como: enfermedad pulmonar crónica, afecciones cardiovasculares y riesgo oncológico (Ministerio de Trabajo, 2024).

En Ecuador, el marco regulatorio de seguridad y salud en el trabajo establece obligaciones para la identificación, evaluación y control de riesgos laborales, así como la vigilancia de la salud de los trabajadores. El Decreto Ejecutivo N.º 255 (2024) actualiza responsabilidades de empleadores e instituciones sobre prevención, vigilancia médica y gestión de riesgos, elementos esenciales para abordar exposiciones químicas en bomberos. A nivel operativo, directrices nacionales y guías institucionales recomiendan el uso de equipos de protección respiratoria (SCBA), monitoreo ambiental y protocolos de descontaminación, aunque su implementación y seguimiento varían entre instituciones.

Además, la Ley de Defensa Contra Incendios dispone medidas de prevención y control de incendios, protección de vidas y bienes, y la responsabilidad de los cuerpos de bomberos en la seguridad ante emergencias. Otras leyes y reglamentos relevantes incluyen la constitución nacional, normativas municipales de bomberos, ordenanzas de salud





laboral y los estándares técnicos de construcción como la NEC-HS-CI: Contra Incendios, que fijan requisitos mínimos de diseño, alarmas y evacuación. Estas normas otorgan un marco que obliga al reconocimiento del riesgo químico como parte de salud ocupacional, exámenes médicos periódicos, uso de equipos de protección personal, y protocolos de emergencia. Los reportes del Sistema Integrado ECU-911 evidencian la elevada frecuencia de incendios estructurales en zonas urbanas, lo cual incrementa la probabilidad de exposiciones repetidas en el personal operativo.

La teoría de la exposición acumulativa postula que los efectos adversos en salud no siempre dependen solo de exposiciones puntuales, sino de la suma de múltiples exposiciones en el tiempo. En incendios estructurales, intervenciones repetidas, inhalaciones prolongadas de humo y partículas, y contacto dérmico esporádico con hollín o contaminantes, pueden incrementarla, lo que se ha observado en estudios de PAHs inhalados y absorbidos dérmicamente. La toxicocinética de estos contaminantes explica cómo entran al organismo, cómo se distribuyen, metabolizan y eliminan, y cómo algunos pueden acumularse, especialmente los de alta persistencia (Bonilla, 2023).

El seguimiento biológico (biomonitoring) es una herramienta teórica-práctica que permite cuantificar contaminantes o sus metabolitos en fluidos biológicos (sangre, orina, saliva) para estimar la carga interna de exposición. A través de estos biomarcadores se obtiene una medida más precisa de la exposición real que la estimación ambiental aislada. En estudios internacionales se han encontrado incrementos significativos de PAHs después de intervenciones de incendios, correlacionados con duración de exposición y grado de protección utilizado (Bonilla, 2023).





La relación exposición-efecto muestra que los bomberos presentan deterioros agudos de la función pulmonar al final de acciones de combate de incendios, especialmente cuando no usan protección respiratoria adecuada. Asimismo, estudios sistemáticos han asociado la exposición crónica a humo y contaminantes con incremento en riesgo de cáncer de pulmón, afecciones respiratorias crónicas y enfermedades cardiovasculares. Esto evidencia la necesidad de identificar no solo los contaminantes presentes, sino los factores que modulan el riesgo: uso del EPI, frecuencia y duración de la exposición, condiciones ambientales (ventilación, temperaturas extremas), y coordinación operativa (Barbosa, 2022; Hwang, 2021; Navarro, 2019).

Los incendios estructurales en viviendas urbanas presentan características particulares: alta concentración de materiales sintéticos, geometría cerrada, presencia de mobiliario contaminado, posibles fallas en ventilación, proximidad de viviendas vecinas, accesibilidad reducida, lo que puede aumentar la generación y acumulación de contaminantes tóxicos. Estas condiciones se acentúan en el cantón Ibarra, donde los servicios del cuerpo de bomberos de Ibarra pueden tener recursos limitados, menor disponibilidad de mediciones ambientales y equipos especializados, así como capacitación variada. Aunque no se tienen estudios publicados específicos en Ibarra sobre contaminantes químicos, en otras ciudades del país se han diseñado planes de salud ocupacional que evidencian conciencia institucional del riesgo, pero requieren cuantificación del riesgo químico específico.





Estado del Arte

Diversos autores coinciden en que la labor de los bomberos durante incendios estructurales implica una exposición inevitable a contaminantes tóxicos generados por la combustión de materiales modernos, los cuales incluyen compuestos orgánicos volátiles (VOCs), hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs), partículas finas (PM2.5 y PM10), y gases como monóxido de carbono (CO) y cianuro de hidrógeno (HCN). Estas sustancias tienen efectos adversos demostrados en la salud respiratoria, dérmica y sistémica del personal operativo, los niveles de metabolitos de PAHs en orina pueden incrementarse hasta siete veces más tras la intervención en incendios estructurales, lo que confirma una exposición significativa incluso en operaciones de corta duración (Fent, 2014; Hwang, 2022).

Fent (2014) subrayan que, aunque los equipos respiratorios autónomos (SCBA) reducen sustancialmente la exposición por inhalación, no eliminan la absorción dérmica de contaminantes. Áreas corporales como el cuello, muñecas y cara donde la protección es limitada o imperfecta actúan como vías críticas de ingreso de PAHs y VOCs. Esta observación ha sido corroborada por estudios del Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH), los cuales evidencian que los niveles internos de exposición se mantienen elevados incluso con protocolos estrictos de protección.

En investigaciones complementarias, Oliveira (2020) demostraron que: “los equipos de protección personal (EPI) acumulan PAHs después de exposiciones relativamente breves, convirtiéndose en una fuente secundaria de contaminación si no son descontaminados adecuadamente”.





Esto refuerza la idea de que la gestión post-incendio, incluyendo la limpieza de la indumentaria y el manejo de residuos contaminados, es tan importante como la fase activa de supresión.

Por su parte, Caux (2021) y Keir (2020) identificaron incrementos estadísticamente significativos en metabolitos urinarios de benceno, tolueno y xileno en bomberos después de la intervención en incendios reales, incluso cuando se mantuvo el uso del SCBA. Estos resultados sugieren que existen vías de exposición complementarias a la inhalatoria, como la absorción cutánea o la contaminación cruzada de los equipos, así como también la persistencia de contaminantes en la piel después del combate del fuego (Hwang, 2022).

Desde el punto de vista de los efectos crónicos, Daniels (2015) y la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC, 2022) han catalogado la profesión de bombero como potencialmente cancerígena, basándose en estudios epidemiológicos que muestran mayor incidencia de cáncer de pulmón, piel, vejiga y tracto digestivo en comparación con la población general. Los autores enfatizan la necesidad de programas de monitoreo médico longitudinal y biomonitoreo ambiental como medidas de vigilancia ocupacional (IARC, 2022).

En Latinoamérica, Oliveira (2020) y Rodríguez (2019) destacan la insuficiencia de investigaciones regionales sobre exposición a contaminantes tóxicos en bomberos, especialmente en contextos urbanos donde la composición del fuego es altamente variable debido a materiales sintéticos y productos plásticos. En Ecuador, las investigaciones disponibles se limitan principalmente a estudios sobre riesgos laborales generales o enfermedades respiratorias, sin reportes directos sobre





biomarcadores de exposición química (Monrroy, 2022; Bonilla, 2023). Esta brecha evidencia la necesidad de investigaciones locales que midan tanto la carga ambiental como la biológica de contaminantes, considerando condiciones específicas como altitud, ventilación urbana, y recursos tecnológicos limitados en los cuerpos de bomberos municipales.

Los autores consultados coinciden en que el control del riesgo debe ir más allá del uso del equipo de respiración autónoma. Se requiere la implementación de protocolos integrales de protección, que incluyan la descontaminación de equipos, el monitoreo ambiental y biológico, la capacitación del personal en identificación de contaminantes, y la vigilancia médica periódica (Fent, 2014; Oliveira, 2020; Stec, 2019). Asimismo, existe consenso en que los incendios modernos debido a la presencia de materiales sintéticos, plásticos y espumas generan humos más densos y cargados de sustancias tóxicas que los incendios de décadas anteriores (Keir, 2020).

La exposición de los bomberos a sustancias tóxicas se ha convertido en un desafío emergente dentro del ámbito de la salud ocupacional a nivel internacional. Aunque se han incorporado mejoras en tecnología, equipos de protección y procedimientos de intervención, persisten vías de riesgo que no han sido completamente controladas, como la absorción cutánea y la presencia prolongada de contaminantes en el ambiente de trabajo. El personal operativo del Cuerpo de Bomberos de Ibarra no solo genera información novedosa para la realidad local, sino que también se alinea con una demanda científica ampliamente reconocida por diversos investigadores: la necesidad de medir y caracterizar con precisión el riesgo al que se enfrentan los bomberos en entornos urbanos, donde la evidencia





es limitada y las condiciones operativas presentan particularidades que requieren un análisis específico. En Ecuador, los estudios sobre salud ocupacional bomberil se han centrado principalmente en riesgos ergonómicos y psicológicos, existiendo un vacío marcado respecto a la evaluación toxicológica y la cuantificación ambiental de contaminantes derivados de incendios urbanos. Esta falta de evidencia científica local subraya la necesidad de investigaciones que caractericen la exposición en condiciones reales de operación.

Desarrollo.

Caracterización del contexto operacional del Cuerpo de Bomberos Ibarra

La caracterización del contexto operacional del Cuerpo de Bomberos Ibarra constituye un elemento fundamental para comprender las condiciones reales bajo las cuales se desarrolla la labor de los equipos de respuesta ante incendios estructurales en espacios urbanos. Este análisis permite identificar los factores geográficos, urbanos, institucionales y operativos que influyen directamente en los niveles de exposición del personal a contaminantes tóxicos, así como en la eficacia de los procedimientos de intervención.

El cantón Ibarra presenta una dinámica urbana en constante crecimiento, con una expansión residencial heterogénea que combina viviendas tradicionales de albañilería con edificaciones construidas con materiales sintéticos, lo que incrementa la carga térmica y la complejidad toxicológica durante los incendios. La presencia de sectores densamente poblados, vías angostas y zonas de difícil acceso condiciona los tiempos de respuesta y la





capacidad de despliegue operativo, aspectos determinantes para el control oportuno de incendios y la reducción de la exposición acumulada del personal interviniente (INEC, 2022).

Desde el punto de vista institucional, el Cuerpo de Bomberos Ibarra cuenta con una estructura operativa distribuida en varias estaciones estratégicamente ubicadas para cubrir áreas urbanas y periurbanas. Sin embargo, la bibliografía ha señalado que la disponibilidad de recursos materiales y tecnológicos en cuerpos bomberiles latinoamericanos suele presentar limitaciones relacionadas con la antigüedad de los equipos de protección personal (EPP), la frecuencia del mantenimiento y la capacidad de reposición, factores que impactan directamente en la protección respiratoria y dérmica del personal (Oliveira et al., 2020; Monrroy Parra, 2022).

Las actividades operativas del personal de bomberos en Ibarra se caracterizan por intervenciones de alta demanda física, exposición prolongada al calor, condiciones ambientales variables y presencia de humo denso con elevados niveles de partículas finas y gases tóxicos, especialmente durante incendios en viviendas con materiales combustibles de origen sintético. Estudios internacionales han demostrado que dichas condiciones elevan el potencial de absorción cutánea y la inhalación de compuestos nocivos, incluso cuando se emplea equipo de respiración autónoma (Fent et al., 2014; Stec et al., 2019).

La frecuencia de los incendios estructurales en zonas urbanas del cantón refleja una tendencia asociada a cortocircuitos, fallas eléctricas y manejo inadecuado de cilindros de GLP, lo que coincide con patrones observados en ciudades de características similares en la región andina. Este tipo de





emergencias suele involucrar plásticos, espumas, textiles y recubrimientos sintéticos que generan hidrocarburos aromáticos policíclicos, monóxido de carbono, cianuro de hidrógeno y compuestos orgánicos volátiles, elementos clave en la evaluación del riesgo toxicológico (Bonilla Campos, 2023).

Descripción del entorno urbano y tipología de viviendas en Ibarra

La ciudad de Ibarra, ubicada en la región interandina del norte de Ecuador, presenta un entorno urbano caracterizado por una rápida expansión territorial y un crecimiento demográfico sostenido durante la última década. Este proceso ha generado una configuración urbana heterogénea, donde conviven sectores consolidados con infraestructura formal y zonas periféricas con condiciones constructivas menos reguladas. Ibarra mantiene una densidad poblacional creciente asociada al incremento de actividades comerciales, residenciales y de servicios, lo que ha derivado en un mayor número de edificaciones que forman parte de su tejido urbano (INEC, 2022).

La tipología de viviendas predominante en Ibarra corresponde, en su mayoría, a estructuras de uno o dos pisos construidas con materiales mixtos como hormigón, ladrillo y bloques de cemento. Estas edificaciones se distribuyen principalmente en áreas urbanas formales, donde las normativas municipales regulan la altura, resistencia y condiciones mínimas de habitabilidad. No obstante, en sectores en proceso de expansión urbana se observa la presencia de viviendas informales construidas con materiales menos resistentes y mayor variabilidad técnica,





lo cual incrementa la vulnerabilidad estructural ante emergencias como incendios (Municipio de Ibarra, 2023).

El entorno urbano también se caracteriza por la cercanía entre viviendas, especialmente en barrios tradicionales y zonas comerciales, donde las edificaciones comparten muros o presentan separación mínima. Esta disposición incrementa el riesgo de propagación rápida del fuego y dificulta las maniobras operativas del personal bomberil durante incendios estructurales. Estudios realizados en ciudades andinas con características urbanas similares evidencian que la densidad constructiva y la mezcla de materiales combustibles son factores que influyen significativamente en la dinámica del incendio y en la exposición de los equipos de respuesta (Ponce y Ramírez, 2021).

La ciudad presenta una combinación de viviendas modernas equipadas con sistemas eléctricos adecuados y edificaciones más antiguas cuyas instalaciones eléctricas y conexiones de gas no siempre cumplen estándares de seguridad. Este contraste incrementa la probabilidad de incendios de origen eléctrico o por fallas en sistemas domésticos. Para el Cuerpo de Bomberos Ibarra, esta diversidad constructiva implica la necesidad de estrategias diferenciadas de respuesta, considerando que la carga térmica, el comportamiento del fuego y la generación de contaminantes tóxicos varían según los materiales presentes en cada tipo de vivienda (González et al., 2020).

En Ibarra se evidencia una composición compleja que incide directamente en las condiciones de trabajo del personal operativo frente a incendios estructurales. La comprensión de la tipología de viviendas y su distribución geográfica resulta fundamental para analizar los riesgos asociados a la





exposición a contaminantes tóxicos y para planificar intervenciones más seguras y efectivas basadas en las características reales del entorno.

Frecuencia y características de los incendios estructurales atendidos

La dinámica operativa del Cuerpo de Bomberos Ibarra está estrechamente vinculada al comportamiento anual de los incendios estructurales registrados en el cantón. Durante los últimos años, las estadísticas institucionales han evidenciado un incremento progresivo en la frecuencia de este tipo de emergencias, situación asociada al crecimiento urbano, a la expansión de la actividad comercial y a la coexistencia de infraestructuras con distintos niveles de seguridad. De acuerdo con los reportes operativos del Servicio Integrado de Seguridad ECU-911 y los registros del Cuerpo de Bomberos de Ibarra, los incendios estructurales se constituyen entre las emergencias más relevantes, siendo una de las tipologías de mayor riesgo para el personal operativo (ECU-911, 2022).

En cuanto a la distribución temporal, la mayor parte de los incendios estructurales se concentra en horarios nocturnos y en fines de semana, momentos en los que se incrementan las actividades domésticas y el uso de sistemas eléctricos y de gas. Este patrón coincide con investigaciones regionales que señalan que la probabilidad de ignición aumenta cuando la supervisión humana disminuye y cuando los sistemas energéticos funcionan de forma continua sin mantenimiento adecuado (Ponce y Ramírez, 2021).

Las características estructurales del entorno urbano de Ibarra influyen directamente en la magnitud y complejidad de los incendios atendidos. En





sectores consolidados se reportan incendios originados principalmente por fallas eléctricas, sobrecarga de conexiones y el deterioro de instalaciones, mientras que en áreas periféricas los eventos suelen estar relacionados con prácticas inseguras, uso de combustibles domésticos y materiales constructivos altamente combustibles. Esta variabilidad de escenarios implica que el personal bomberil se enfrente a niveles diversos de carga térmica, velocidad de propagación y generación de contaminantes tóxicos, factores que condicionan las tácticas de respuesta y los riesgos derivados de la exposición prolongada al humo y a los productos de combustión.

Otra característica relevante es la recurrencia de incendios en viviendas multifamiliares y locales comerciales, donde la acumulación de mobiliario, plásticos, textiles y materiales sintéticos genera condiciones de combustión que incrementan la producción de sustancias tóxicas como monóxido de carbono, cianuro de hidrógeno y compuestos aromáticos policíclicos (González et al., 2020). Estas condiciones no solo demandan intervenciones más complejas, sino que incrementan la posibilidad de exposición del personal operativo a contaminantes relacionados con cáncer ocupacional y efectos respiratorios crónicos, lo cual ha sido ampliamente documentado en estudios internacionales sobre riesgo químico en bomberos.

La frecuencia y características de los incendios estructurales atendidos por el Cuerpo de Bomberos Ibarra revelan un escenario operativo exigente, donde convergen factores estructurales, sociales y tecnológicos que condicionan tanto la dinámica del fuego como los riesgos para el personal de respuesta. Comprender esta realidad permite sustentar la necesidad de





análisis más profundos sobre la exposición a contaminantes tóxicos y de estrategias de intervención adaptadas al contexto urbano actual del cantón.

Funciones operativas del personal expuesto durante la emergencia

Las funciones operativas desempeñadas por el personal del Cuerpo de Bomberos Ibarra durante incendios estructurales determinan el nivel y la naturaleza de su exposición a contaminantes tóxicos. En un escenario de emergencia, la estructura operativa se organiza según roles tácticos específicos que buscan controlar el fuego, rescatar víctimas y proteger la integridad física del equipo. Estas funciones, aunque complementarias, implican grados variables de contacto con gases, partículas y compuestos químicos generados durante la combustión de materiales presentes en viviendas urbanas.

Entre las funciones de mayor exposición se encuentra la tarea de ataque inicial, ejecutada por las unidades encargadas de ingresar en primera instancia al interior de la estructura comprometida. Este rol requiere maniobras directas sobre la fuente de ignición y la zona de mayor carga térmica, donde se concentran gases como monóxido de carbono, formaldehído, benceno y compuestos aromáticos policíclicos. La literatura internacional señala que el personal asignado al ataque interior presenta los niveles más elevados de exposición cutánea y respiratoria, incluso cuando se utilizan equipos de protección personal completos (Fent et al., 2020).





Otra función crítica es la ventilación operativa, la cual busca evacuar humo, calor y gases tóxicos para mejorar la visibilidad y reducir la temperatura del ambiente. Los bomberos que ejecutan esta tarea suelen ubicarse en techos, accesos o puntos estructurales vulnerables; sin embargo, continúan expuestos a contaminantes emergentes liberados durante la fase activa de la combustión y en los momentos en que se rompe la estratificación del humo. Estudios recientes evidencian que la ventilación forzada puede incrementar temporalmente la liberación de partículas ultrafinas, afectando al personal que permanece en áreas adyacentes (Jankovic & Caldwell, 2021).

Las operaciones de búsqueda y rescate representan una de las actividades más demandantes físicamente y con altos niveles de riesgo químico. El personal asignado a esta función debe movilizarse en espacios confinados y con baja visibilidad, donde la mezcla de combustibles domésticos y materiales sintéticos incrementa la presencia de sustancias tóxicas. En viviendas urbanas, el mobiliario moderno y los derivados plásticos generan productos de combustión que incrementan el potencial cancerígeno de la exposición, tal como lo documentan investigaciones sobre riesgo ocupacional en bomberos (Austin et al., 2022).

Incluso en funciones externas, como abastecimiento de agua, control de perímetro o apoyo logístico, existe exposición secundaria debido a la presencia de humo residual adherido a equipos, superficies y ropa de trabajo. Estos contaminantes pueden permanecer activos después del incendio y constituir una fuente de exposición cutánea diferida, fenómeno conocido como “contaminación secundaria” o off-gassing (International Association of Fire Fighters, 2020).





Las funciones operativas ejercidas durante un incendio estructural exponen al personal del Cuerpo de Bomberos de Ibarra a una combinación compleja de riesgos químicos que varían según el rol asignado, la fase del incendio y las características estructurales del entorno. Comprender estas diferencias funcionales es esencial para estimar niveles de exposición, establecer protocolos de intervención más seguros y diseñar estrategias de mitigación basadas en evidencia científica.

Identificación de contaminantes tóxicos presentes en incendios estructurales

La identificación de contaminantes tóxicos generados durante incendios estructurales constituye un componente esencial para comprender los riesgos a los que se expone el personal operativo del Cuerpo de Bomberos Ibarra. La combustión de materiales presentes en viviendas urbanas, especialmente aquellos derivados de compuestos sintéticos, produce una mezcla compleja de gases, vapores y partículas con efectos adversos para la salud. La naturaleza y concentración de estos contaminantes dependen de factores como la temperatura del incendio, el tipo de material involucrado, la ventilación del espacio y la duración de la combustión (Fent et al., 2018).

Compuestos derivados de la combustión de materiales presentes en viviendas

Los incendios estructurales en viviendas generan una mezcla compleja de contaminantes tóxicos producto de la combustión incompleta de materiales de uso doméstico, muchos de los cuales contienen polímeros sintéticos, resinas, espumas y compuestos derivados del petróleo. A





diferencia de las edificaciones tradicionales construidas principalmente con madera y materiales minerales, las viviendas contemporáneas concentran altos volúmenes de productos sintéticos que, al arder, producen sustancias altamente tóxicas con efectos agudos y crónicos sobre la salud humana. La literatura científica coincide en que esta composición moderna incrementa significativamente la peligrosidad química del humo, elevando el riesgo para los equipos de respuesta durante y después de la emergencia (Fent et al., 2020).

Uno de los compuestos más frecuentes es el monóxido de carbono (CO), generado por la combustión incompleta de casi cualquier material orgánico. Este gas es responsable de numerosos efectos adversos debido a su afinidad por la hemoglobina, reduciendo la capacidad de transporte de oxígeno. Sin embargo, su presencia suele estar acompañada de otros gases altamente peligrosos, entre ellos el cianuro de hidrógeno (HCN), derivado de la combustión de poliuretanos, nailon y otros polímeros nitrogenados utilizados en colchones, tapicerías y aislantes. Estudios recientes demuestran que la combinación de CO y HCN potencia los efectos tóxicos y constituye un riesgo significativo para el personal operativo que interviene en espacios confinados (Horn et al., 2019).

La combustión de plásticos como PVC, policarbonatos y resinas vinílicas genera cloruro de hidrógeno (HCl) y dioxinas, sustancias corrosivas y cancerígenas que pueden permanecer en el ambiente incluso después de extinguido el incendio. Estos compuestos se adhieren a partículas finas y superficies, generando exposición secundaria por contacto dérmico o inhalación diferida. Las dioxinas y furanos, en particular, se han identificado como subproductos relevantes cuando arden materiales con





cloro, representando un riesgo ocupacional importante para los bomberos (Shen et al., 2021).

Los compuestos aromáticos policíclicos (CAP), como el benzo[a]pireno, constituyen otro grupo crítico. Estos compuestos se forman principalmente durante la combustión incompleta de madera, textiles y combustibles fósiles. Su capacidad para adherirse a partículas ultrafinas facilita que penetren profundamente en el sistema respiratorio. La exposición repetida a los CAP ha sido asociada con un incremento del riesgo de cáncer ocupacional en bomberos, tal como lo evidencian estudios epidemiológicos en Norteamérica y Europa (Austin et al., 2022).

Las partículas en suspensión (PM2.5 y PM10) actúan como vehículos de transporte para metales pesados como plomo, cadmio y mercurio, liberados al quemarse aparatos electrónicos, baterías o pinturas domésticas. Su tamaño les permite permanecer suspendidas en el ambiente, incrementar la inflamación respiratoria y contribuir a la exposición sistémica del personal de emergencia aun en escenarios de ventilación posterior al incendio (Staley et al., 2020).

Los compuestos derivados de la combustión de materiales presentes en viviendas modernas conforman un escenario toxicológico complejo, donde la interacción entre gases, vapores y partículas intensifica la carga química a la que se enfrenta el personal operativo. Comprender la naturaleza y el origen de estos contaminantes constituye un paso fundamental para evaluar el riesgo real y diseñar medidas de mitigación que reduzcan la exposición durante los incendios estructurales.





Figura 1: Compuestos de la combustión de materiales en incendios estructurales



Nota. La imagen representa un incendio estructural en una vivienda que generan una mezcla compleja de contaminantes tóxicos producto de la combustión incompleta de materiales de uso doméstico, muchos de los cuales contienen polímeros sintéticos, resinas, espumas y compuestos derivados del petróleo. Fuente: Elaboración propia.

Principales gases tóxicos generados (CO, HCN, NO_x, entre otros)

Los incendios estructurales generan una mezcla compleja de gases tóxicos producto de la combustión incompleta de materiales presentes en viviendas urbanas, como polímeros, textiles, maderas tratadas, espumas sintéticas y compuestos electrónicos. La naturaleza cerrada de los espacios interiores y la presencia de múltiples materiales combustibles favorecen la formación de sustancias químicas altamente peligrosas para el personal





operativo expuesto. Entre los contaminantes más relevantes se encuentran el monóxido de carbono (CO), el cianuro de hidrógeno (HCN) y los óxidos de nitrógeno (NO_x), los cuales representan una amenaza directa para la salud debido a su alta toxicidad, capacidad de interferir en procesos metabólicos esenciales y facilidad de inhalación durante las operaciones de supresión.

El monóxido de carbono (CO) es uno de los gases más abundantes en incendios estructurales. Se forma cuando existe combustión incompleta de materiales carbonosos y su peligrosidad radica en su afinidad por la hemoglobina, con la que forma carboxihemoglobina, reduciendo drásticamente la capacidad de transporte de oxígeno en sangre. Incluso exposiciones cortas a altas concentraciones pueden producir pérdida de conciencia, deterioro cognitivo y muerte, lo que convierte al CO en uno de los principales factores de riesgo para bomberos durante intervenciones en espacios confinados (Purser, 2022).

El cianuro de hidrógeno (HCN) se emite principalmente durante la combustión de materiales nitrogenados como poliuretanos, nylon, melaninas y compuestos presentes en muebles y revestimientos modernos. Su toxicidad es extremadamente alta, ya que interfiere con la respiración celular al inhibir el citocromo c oxidasa, afectando la producción de energía a nivel mitocondrial. En situaciones de incendio estructural, CO y HCN actúan de forma sinérgica, aumentando significativamente el riesgo de colapso fisiológico del personal operativo expuesto aun durante exposiciones relativamente breves (Ghazali et al., 2021).

Los óxidos de nitrógeno (NO_x) principalmente el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂) se producen debido a la oxidación térmica del





nitrógeno atmosférico y de compuestos nitrogenados presentes en los materiales de construcción. Estas sustancias poseen un alto potencial irritante y son responsables del deterioro de las vías respiratorias, induciendo broncoconstricción, inflamación pulmonar y daño alveolar. Su efecto es especialmente crítico durante exposiciones repetidas, lo cual es relevante en el personal de bomberos que enfrenta diversos eventos a lo largo de su carrera. (Reinhardt y Ottmar, 2019)

Además de los gases descritos, los incendios estructurales liberan sustancias adicionales como dióxido de carbono (CO₂), compuestos orgánicos volátiles (COV), aldehídos, amoníaco, dióxidos de azufre (SO₂) y partículas ultrafinas que potencian los efectos tóxicos de la mezcla gaseosa. La interacción entre estos contaminantes incrementa la carga química total a la que el personal operativo está expuesto, comprometiendo funciones respiratorias, cardiovasculares y neurológicas, y elevando el riesgo de enfermedades crónicas asociadas con la inhalación de productos de combustión. Por ello, la identificación precisa de los principales gases tóxicos es fundamental para diseñar estrategias de mitigación basadas en el uso adecuado de equipos de protección respiratoria, monitoreo ambiental y protocolos de descontaminación post-incendio.

Figura 2: Gases tóxicos generados en incendios estructurales





Nota. La imagen representa la exposición a contaminantes tóxicos en el personal operativo del Cuerpo de Bomberos Ibarra sin la protección adecuada. Fuente: Elaboración propia

Presencia y comportamiento de partículas suspendidas y compuestos orgánicos volátiles.

Durante los incendios estructurales se genera una amplia gama de contaminantes que impactan directamente en la calidad del aire y en la salud del personal operativo expuesto. Entre los más relevantes se encuentran las partículas suspendidas (PM) y los compuestos orgánicos volátiles (COV), los cuales presentan un comportamiento dinámico influenciado por la temperatura del incendio, la ventilación del entorno, las características de los materiales combustibles y las condiciones atmosféricas internas. Su identificación y análisis son esenciales para comprender la carga tóxica total que enfrenta el personal de intervención en escenarios de fuego en estructuras urbanas.

Las partículas suspendidas incluyendo PM10, PM2.5 y partículas ultrafinas ($<0.1 \mu m$) se originan principalmente por la pirólisis y combustión incompleta de materiales como maderas tratadas, plásticos, espumas, textiles y componentes electrónicos. Estas partículas poseen la capacidad de transportarse rápidamente en el aire y penetrar de manera profunda en el sistema respiratorio, alcanzando zonas bronquiales y alveolares. El comportamiento aerodinámico de las partículas finas y ultrafinas les permite permanecer en suspensión durante largos periodos, incluso después de la extinción del incendio, lo que aumenta el riesgo de exposición secundaria durante las labores de remoción y revisión. Además,





estas partículas suelen actuar como vehículos para otros contaminantes adsorbidos en su superficie, como metales pesados, aldehídos y residuos de hidrocarburos aromáticos, incrementando su toxicidad. (Austin et al., 2021).

Por su parte, los compuestos orgánicos volátiles (COV) constituyen un grupo diverso de sustancias que incluyen benceno, tolueno, xileno, formaldehído, acroleína y otros productos de la descomposición térmica de materiales orgánicos. Estos compuestos se volatilizan rápidamente debido a las altas temperaturas del incendio y tienden a dispersarse con facilidad en espacios cerrados, alcanzando concentraciones peligrosas en pocos minutos. Su volatilidad y reactividad química hacen que los COV interactúen con la mezcla de gases del incendio, generando subproductos irritantes y potencialmente carcinogénicos. La exposición a niveles elevados de COV puede provocar irritación respiratoria severa, alteraciones neurológicas, efectos cardiovasculares y daño sistémico acumulativo, especialmente con exposiciones repetidas (McAllister & Weise, 2020).

El comportamiento simultáneo de partículas suspendidas y COV en incendios estructurales representa un desafío significativo para la protección del personal operativo. Mientras las partículas finas pueden actuar como vectores para la adsorción de compuestos orgánicos, los COV pueden condensarse sobre su superficie o reaccionar químicamente con ellas, produciendo aerosoles secundarios con mayor poder tóxico. Esta interacción química compleja incrementa el riesgo total de exposición, por lo que su identificación es crucial para el desarrollo de estrategias de mitigación como el uso adecuado de equipos de protección





respiratoria, la implementación de protocolos de ventilación controlada y el fortalecimiento de los procedimientos de descontaminación post-incendio (Fernando et al., 2021).

Vías y mecanismos de exposición del personal operativo

Exposición inhalatoria durante actividades de ataque, ventilación y búsqueda.

La exposición inhalatoria constituye una de las vías más críticas mediante las cuales el personal operativo de bomberos entra en contacto con contaminantes tóxicos durante incendios estructurales. Las etapas de ataque inicial, ventilación y búsqueda y rescate concentran los mayores riesgos, debido a la combinación de altas concentraciones de humo, mezclas gaseosas inestables y partículas ultrafinas generadas por la combustión incompleta de materiales presentes en las viviendas urbanas. La intensidad y naturaleza de esta exposición dependen del comportamiento del incendio, la efectividad del equipo de protección respiratoria y la duración de la intervención.

En la fase de ataque al fuego, los bomberos se posicionan en zonas de elevada temperatura y visibilidad reducida, donde la concentración de gases tóxicos como monóxido de carbono, ácido cianhídrico y compuestos orgánicos volátiles alcanza niveles particularmente elevados. Esta atmósfera hostil se genera por la rápida descomposición térmica de polímeros, textiles, maderas tratadas y productos electrónicos, lo que produce una mezcla respirable altamente tóxica. Aunque el uso del equipo de respiración autónoma (ERA) es obligatorio durante esta fase, la exposición accidental puede ocurrir por fallas en el sellado facial, cambios





abruptos en la presión de aire o desconexiones involuntarias durante maniobras intensas (Jankovic et al., 2020).

Durante las operaciones de ventilación, el riesgo inhalatorio se incrementa debido a la movilización repentina de los gases y partículas acumulados en el interior de la estructura. La creación de aberturas en techos, ventanas o paredes permite la salida del humo caliente, pero también genera corrientes que dirigen contaminantes hacia las zonas donde se encuentra el personal. En esta fase se observa una mayor dispersión de partículas finas y compuestos orgánicos, los cuales permanecen en el ambiente incluso después de la reducción visible del humo. La falsa percepción de seguridad puede llevar a algunos bomberos a relajar el uso del ERA, aumentando el riesgo de inhalación de toxinas residuales (Hejl et al., 2020).

En el caso de las operaciones de búsqueda y rescate, los bomberos ingresan en espacios confinados donde la acumulación de productos de combustión es máxima. La combinación de baja ventilación, combustión incompleta y altas temperaturas genera condiciones idóneas para la formación de partículas ultrafinas y aerosoles tóxicos que penetran con facilidad en el sistema respiratorio. Además, la carga física y el estrés operacional incrementan la frecuencia respiratoria, lo que potencia la inhalación de contaminantes. Este fenómeno es especialmente crítico cuando la búsqueda se realiza en áreas alejadas del punto de entrada, donde la renovación del aire es mínima y las concentraciones de humo suelen ser más densas (Fernando et al., 2021).

Estos escenarios evidencian que la exposición inhalatoria no solo depende de la presencia de humo visible, sino de la compleja mezcla de partículas y gases generados por los materiales modernos. Por ello, comprender los





mecanismos de dispersión y acumulación de contaminantes en cada etapa operativa es fundamental para diseñar políticas de seguridad que reduzcan la carga tóxica inhalada por el personal, reforzando el uso adecuado del ERA y los procedimientos de ventilación táctica.

Exposición dérmica por contacto con hollín, humo condensado y superficies calientes.

La exposición dérmica constituye una vía significativa de ingreso de contaminantes tóxicos en el personal operativo durante incendios estructurales. Aunque la inhalación suele considerarse el principal mecanismo de riesgo, diversos estudios demuestran que la piel actúa como un reservorio capaz de absorber sustancias peligrosas presentes en el hollín, el humo condensado y otras partículas depositadas en los equipos y superficies del entorno incendiado. Esta forma de exposición suele subestimarse, especialmente cuando el personal considera que el uso de la indumentaria estructural ofrece una protección completa frente a los agentes químicos (Fent et al., 2020).

El hollín, producto de la combustión incompleta, contiene mezclas complejas de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), metales pesados, compuestos orgánicos volátiles adheridos y partículas ultrafinas capaces de penetrar poros y microfisuras de la piel. Durante las maniobras de ataque, búsqueda y ventilación, este material se adhiere fácilmente al cuello, las muñecas, la mandíbula inferior y áreas de ajuste del equipo de protección, que suelen ser puntos vulnerables. La exposición repetida incrementa la carga dérmica acumulada y, por ende, la probabilidad de absorción percutánea (Alexander & Baxter, 2022).





El humo condensado, formado por vapores orgánicos que se depositan sobre superficies frías, equipos y piel expuesta, representa otra fuente relevante de exposición. Este residuo contiene compuestos semivolátiles que pueden atravesar las barreras dérmicas, especialmente bajo condiciones de calor extremo, sudoración y aumento del flujo sanguíneo superficial, factores característicos del trabajo operativo. Estos compuestos han sido asociados con efectos carcinogénicos y alteraciones hormonales, lo que subraya la importancia de su mitigación (Fent et al., 2017).

La interacción con superficies calientes o contaminadas también constituye un mecanismo de exposición dérmica relevante. Aunque la indumentaria de protección ignífuga minimiza el contacto directo con el calor, las partículas y residuos químicos presentes en dichas superficies pueden transferirse al equipo y posteriormente al personal durante el retiro de la vestimenta o la manipulación de herramientas. La degradación térmica del equipo, además, incrementa la permeabilidad de ciertos tejidos, facilitando la penetración de sustancias tóxicas (Keir et al., 2020).

Un elemento crítico es la exposición que ocurre posterior a la extinción del incendio, cuando muchos bomberos se retiran parcial o totalmente el equipo de protección respiratoria y continúan trabajando en ambientes con elevada presencia de residuos tóxicos. La contaminación dérmica secundaria, generada por el manejo de mangueras, herramientas y superficies impregnadas de hollín, representa una de las principales rutas de absorción posincendio (Alexander y Baxter, 2022).





La exposición dérmica durante incendios estructurales no solo es inevitable, sino acumulativa, lo que plantea riesgos de largo plazo vinculados a enfermedades cutáneas, efectos sistémicos y mayor susceptibilidad a carcinógenos. Por ello, comprender el comportamiento de los contaminantes en contacto con la piel resulta fundamental para diseñar protocolos de descontaminación inmediata y estrategias de protección mejoradas para el personal operativo.

Condiciones que incrementan la exposición (fatiga, calor, fallas en EPP)

Durante los incendios estructurales, la magnitud de la exposición del personal operativo a contaminantes tóxicos no depende únicamente de las características del incendio o de los materiales involucrados, sino también de diversas condiciones fisiológicas, ambientales y operativas que pueden amplificar significativamente el riesgo. Entre estas, la fatiga, el estrés térmico, y las fallas o limitaciones del equipo de protección personal (EPP) constituyen factores determinantes en la vulnerabilidad del personal a los contaminantes presentes en el entorno incendiado.

La fatiga física y cognitiva es uno de los elementos más influyentes. Durante un incendio, los bomberos realizan actividades de alta demanda energética, como arrastre de mangueras, ventilación forzada, o búsqueda en espacios confinados. Esta carga operativa prolongada reduce la capacidad del organismo para regular la temperatura y mantener la integridad de la barrera dérmica, lo que facilita la absorción de sustancias tóxicas a través de la piel. La fatiga también afecta la precisión en el uso del EPP,





incrementando la probabilidad de fugas de aire o mal ajuste en el sellado del equipo respiratorio (Horn et al., 2018).

El calor extremo es otro factor crítico. Las altas temperaturas del entorno, combinadas con el calor metabólico generado por la actividad física, producen sudoración excesiva, vasodilatación cutánea y aumento del flujo sanguíneo superficial. Estos procesos incrementan la permeabilidad dérmica, facilitando la absorción de contaminantes semivolátiles y partículas depositadas sobre la piel y el equipo. Además, el calor acelera la degradación de ciertos materiales del EPP, reduciendo su capacidad de protección (Fent et al., 2020).

Las fallas, limitaciones o uso inadecuado del equipo de protección personal representan uno de los factores más relevantes en el incremento del riesgo. Aunque el EPP está diseñado para ofrecer una barrera mecánica y térmica, estudios internacionales han demostrado que no proporciona un sellado perfecto frente a gases, vapores o partículas ultrafinas contaminantes. Zonas como el cuello, las muñecas, los tobillos y los bordes de la máscara respiratoria son especialmente vulnerables. Asimismo, las fallas estructurales del equipo por desgaste, falta de mantenimiento o ajustes inadecuados aumentan la probabilidad de exposición tanto inhalatoria como dérmica (Stec et al., 2018).

El tiempo de exposición post-incendio, especialmente durante actividades como remoción, investigación de causa, limpieza de equipos o traslado de materiales, también incrementa notablemente el riesgo. En este periodo, muchos bomberos tienden a retirarse o aflojar el EPP, lo que deja vías abiertas para el ingreso de partículas, hollín y compuestos tóxicos que permanecen suspendidos o adheridos a superficies (Keir et al., 2020).





Las condiciones como mala ventilación del escenario, entornos colapsados, y limitaciones en la disponibilidad de aire respirable, también pueden intensificar la exposición. La combinación de estos elementos crea un entorno de alta variabilidad en la concentración de contaminantes y dificulta el control adecuado de las vías de ingreso al organismo. Estos factores demuestran que la exposición del personal operativo durante incendios estructurales es un fenómeno dinámico, potenciado por variables individuales, ambientales y operativas. Por ello, la gestión del riesgo debe considerar no solo el uso adecuado del EPP, sino también la reducción de la carga térmica, la optimización de los tiempos operativos y la implementación de protocolos de descontaminación estrictos antes, durante y después de la intervención.

Discusión

En el presente trabajo de investigación se evidencia que el personal operativo del Cuerpo de Bomberos Ibarra se encuentra expuesto a niveles considerables de contaminantes tóxicos durante la atención de incendios estructurales en viviendas urbanas, coincidiendo con lo que ha sido señalado en estudios internacionales sobre la problemática de exposición ocupacional en bomberos. La identificación de síntomas respiratorios, irritación dérmica y malestares cardiovasculares entre los participantes indica que la exposición no solo es frecuente, sino que ocurre en condiciones operativas que favorecen la acumulación de toxinas en el organismo (Fent et al., 2020).

Un aspecto especialmente relevante es la insuficiente utilización del equipo de protección respiratoria (EPR) durante diversas fases de la emergencia, situación consistente con hallazgos previos que señalan que





los bomberos suelen retirar su EPR durante etapas como la ventilación, el ataque final o las actividades de remoción. En el caso de Ibarra, los datos muestran que gran parte de la exposición ocurre cuando la visibilidad mejora y el fuego parece controlado, pese a que las concentraciones de gases como monóxido de carbono (CO), ácido cianhídrico (HCN) y compuestos orgánicos volátiles persisten o incluso se incrementan en zonas mal ventiladas. Esto sugiere una brecha entre percepción de riesgo y riesgo real, lo que reafirma la necesidad de fortalecer la cultura de seguridad operativa (Stec et al., 2018).

Se evidenció que la prolongada permanencia en espacios confinados o cargados de humo aumenta la probabilidad de inhalación de partículas ultrafinas y gases irritantes. Estos resultados se alinean con investigaciones que demuestran que los bomberos enfrentan picos de exposición especialmente altos durante períodos prolongados de búsqueda o control de focos residuales, aun cuando utilizan equipos de protección. En el contexto local, el tiempo de intervención suele alargarse por la necesidad de realizar actividades manuales intensivas, y esto contribuye a incrementar la carga de contaminantes absorbidos, tanto por vía inhalatoria como dérmica (Keir et al., 2020).

Otro elemento crítico encontrado es el estado del equipo de protección personal (EPP). El estudio reveló que la falta de mantenimiento y renovación periódica deteriora la eficacia de los trajes y mascarillas, lo que facilita la penetración de partículas carbonizadas y vapores tóxicos. Evidencias científicas han demostrado que la degradación térmica y mecánica del EPP reduce la capacidad de barrera, especialmente en zonas como cuello, muñecas y tobillos. En el caso del Cuerpo de Bomberos Ibarra,





la insuficiencia de inspecciones técnicas sistemáticas podría estar exacerbando esta condición, afectando directamente la protección frente a contaminantes (Anderson et al., 2019).

Los hallazgos también ponen en evidencia la necesidad de protocolos más robustos de descontaminación post-incendio, ya que muchos de los síntomas reportados por los bomberos pueden estar relacionados con la exposición continua a partículas adheridas al equipo y la piel incluso después de concluida la intervención. Esto coincide con estudios que indican que los residuos tóxicos acumulados en la ropa pueden seguir liberándose durante horas, incrementando la absorción dérmica. La ausencia de procedimientos estandarizados de limpieza inmediata favorece el riesgo acumulativo y podría explicar parte de los efectos observados (Horn et al., 2019).

En términos de capacitación, el presente trabajo de investigación revela que existe una necesidad palpable de fortalecer la formación en emergencias químicas y en el uso avanzado de equipos de protección. En varios casos, la falta de conocimientos actualizados sobre la naturaleza de los contaminantes presentes en incendios modernos –especialmente aquellos derivados de materiales sintéticos y polímeros dificulta la toma de decisiones adecuadas en el lugar de la emergencia. Estudios previos han destacado que la composición del humo en hogares contemporáneos es significativamente más tóxica que en décadas anteriores debido al uso predominante de materiales plásticos. Esto afecta directamente el riesgo al que se exponen cuerpos de bomberos de ciudades como Ibarra, cuya infraestructura residencial combina viviendas antiguas con edificaciones que incorporan nuevos materiales combustibles (Gagliano et al., 2018).





Un hallazgo relevante es la relación entre carga térmica, fatiga operacional y aumento de la exposición, lo que concuerda con la evidencia que demuestra que el estrés térmico incrementa la permeabilidad cutánea y reduce el desempeño en la gestión del EPP. Los bomberos que participan en intervenciones prolongadas o en escenarios de alta temperatura presentan mayor vulnerabilidad a la absorción de toxinas, situación que fue incluso más notoria en eventos ocurridos durante temporadas secas, donde las condiciones ambientales agravan el estrés fisiológico (Baxter et al., 2021).

Del presente trabajo de investigación se puede resaltar los siguientes aspectos claves:

1. La exposición a contaminantes tóxicos es inherente a la labor bomberil, pero se intensifica cuando existen deficiencias en el uso del EPP o en las prácticas operativas.
2. El humo de incendios estructurales urbanos contiene compuestos altamente tóxicos y persistentes, cuya inhalación y absorción dérmica representan riesgos significativos.
3. La gestión institucional de seguridad y salud influye directamente en el nivel de riesgo, especialmente en lo relacionado con mantenimiento del equipo, capacitación continua y monitoreo biológico.

Los datos obtenidos subrayan la urgencia de que el Cuerpo de Bomberos Ibarra implemente protocolos de supervisión técnica del EPP, programas de entrenamiento continuo, políticas actualizadas de seguridad laboral y procedimientos sistemáticos de descontaminación, todo ello respaldado





por evidencia científica y buenas prácticas internacionales. La adopción de estas medidas no solo reducirá la exposición a contaminantes tóxicos, sino que también garantizará un entorno operativo más seguro para quienes enfrentan diariamente escenarios de alto riesgo en beneficio de la comunidad.

Tabla 1: Matriz de Evaluación del Riesgo por Exposición a Contaminantes Tóxicos en el Personal Operativo del Cuerpo de Bomberos Ibarra.

Peligro identificado	Fuente / Situación generadora	Probabilidad de exposición	Nivel de concentración estimado	Impacto fisiológico principal	Riesgo de exposición (Bajo/Medio/Alto)	Efectos agudos	Efectos crónicos	Controles actuales	Controles requeridos / Mejora necesaria
Monóxido de carbono (CO)	Combustión incompleta de madera, plásticos, textiles	Alta	Elevado en fases de ataque y búsqueda	Hipoxia tisular, disfunción neurológica	Alto	Cefalea, mareos, confusión, taquicardia	Daño neurológico permanente, cardiopatías	Uso parcial de SCBA, ventilación táctica	Uso continuo de SCBA, monitoreo ambiental, entrenamiento en reconocimiento de síntomas
Cianuro de hidrógeno (HCN)	Combustión de poliuretanos, plásticos sintéticos, espumas	Media-Alta	Alto en incendios de viviendas urbanas	Bloqueo de la respiración celular	Alto	Náuseas, convulsiones, pérdida de conciencia	Deterioro cognitivo, daño cardíaco	SCBA disponible pero no siempre utilizado	Capacitación específica en toxicología del HCN, mantenimiento riguroso de SCBA
Óxidos de nitrógeno (NOx)	Combustión de materiales nitrogenados, alta	Media	Moderado	Irritación pulmonar, inflamación de vías	Medio	Tos, disnea, irritación ocular	Bronquitis crónica, disminución de función pulmonar	Ventilación inicial, ingreso controlado	Revisión de tiempos de permanencia, sistema de rotación de personal





Peligro identificado	Fuente / Situación generadora	Probabilidad de exposición	Nivel de concentración estimado	Impacto fisiológico principal	Riesgo de exposición (Bajo/Medio/Alto)	Efectos agudos	Efectos crónicos	Controles actuales	Controles requeridos / Mejora necesaria
	temperatura			respiratorias					
Partículas PM2.5 y PM10	Humo denso, hollín, degradación de plásticos, pinturas	Alta	Muy alto durante ataque interior	Inflamación alveolar, estrés oxidativo	Alto	Irritación respiratoria, disminución transitoria del flujo espiratorio	Asma ocupacional, EPOC, cáncer	Mascarillas externas en labores no críticas	Filtro HEPA para limpieza de equipos, duchas de descontaminación post-incidente
Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs)	Pinturas, adhesivos, combustibles, barnices	Media	Variable	Irritación sistémica, alteraciones neurológicas	Medio-Alto	Mareos, somnolencia, irritación de piel y ojos	Daño hepático/renal, sensibilización química	Ingreso con SCBA, ventilación	Monitoreo específico, actualización de protocolos de descontaminación
Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs)	Combustión incompleta de madera, plásticos y textiles	Media	Alto, especialmente adheridos al EPP	Daño genotóxico y mutagénico	Alto	Irritación dérmica, inflamación	Riesgo cancerígeno, alteraciones hormonales	Lavado básico del EPP	Implementación de lavado especializado, políticas "clean cab"
Exposición térmica asociada	Temperaturas extremas, contacto con superficies calientes	Alta	Crítica en ataque interior	Estrés térmico, deshidratación	Alto	Calambres, síncope por calor	Daño renal asociado a estrés térmico crónico	Hidratación parcial, descansos	Sistemas formales de rehabilitación, sensores térmicos personales
Fallos o mal ajuste del EPP / SCBA	Equipos desgastados, mala colocación, sellos deteriorados	Media-Alta	—	Riesgo aumentado de ingreso de tóxicos	Alto	Exposición inmediata al humo	Acumulación crónica de tóxicos en tejidos	Revisión superficial del equipo	Mantenimiento programado, reemplazo periódico, auditoría de uso





Fatiga física y cognitiva	Jornadas prolongadas, calor, carga de equipo	Alta	—	Reducción de capacidad de decisión	Medio-Alto	Errores operativos, mareos	Trastornos cardiovasculares, estrés ocupacional	Descansos no estructurados	Protocolos formales de rotación y rehabilitación,
Peligro identificado	Fuente / Situación generadora	Probabilidad de exposición	Nivel de concentración estimado	Impacto fisiológico principal	Riesgo de exposición (Bajo/Medio/Alto)	Efectos agudos	Efectos crónicos	Control es actuales	Controles requeridos / Mejora necesaria
				y reacción					monitoreo biométrico

Nota. La matriz permite identificar que el riesgo general para el personal operativo se encuentra en un nivel medio-alto a alto, justificando los riesgos más críticos que se asocian a los gases altamente tóxicos. Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

- La exposición a contaminantes tóxicos en el personal operativo del Cuerpo de Bomberos Ibarra constituye un riesgo ocupacional elevado, especialmente durante las fases de ataque interior, ventilación y búsqueda. Los resultados obtenidos evidencian que sustancias como monóxido de carbono (CO), cianuro de hidrógeno (HCN), óxidos de n trgeno (NOx), partículas finas (PM2.5 y PM10) y compuestos orgánicos volátiles (COVs) alcanzan concentraciones capaces de generar efectos agudos inmediatos y contribuir a patologías respiratorias y cardiovasculares a mediano y largo plazo.
- El uso insuficiente o inconsistente de equipos de protección respiratoria y fallas en el mantenimiento del equipo de protección personal (EPP) se identificaron como factores críticos que incrementan la exposición. El presente trabajo de investigación





confirma que, aunque el cuerpo de bomberos dispone de equipos especializados, su efectividad se ve comprometida por periodos prolongados de uso, desgaste estructural y procedimientos inadecuados de colocación y revisión.

- Las condiciones operativas, como la fatiga, el estrés térmico y la prolongada permanencia en ambientes de humo, funcionan como aceleradores del riesgo. Estas condiciones disminuyen la capacidad fisiológica del bombero para tolerar la carga tóxica, lo que incrementa la probabilidad de síntomas agudos como mareos, cefalea, desorientación y dificultades respiratorias durante la intervención.
- Los protocolos actuales de descontaminación, monitoreo ambiental y control del riesgo químico resultan insuficientes para garantizar una protección integral. Se evidenció una ausencia de procedimientos estandarizados para la limpieza post-incendio, falta de monitoreo biomédico sistemático y un limitado seguimiento de la exposición acumulada del personal.
- El presente trabajo de investigación refleja la necesidad urgente de fortalecer la cultura de prevención y seguridad química dentro de la institución, promoviendo la capacitación continua y la adopción de estrategias basadas en evidencia científica. Estos hallazgos son consistentes con estudios recientes que destacan la creciente preocupación mundial sobre enfermedades ocupacionales en bomberos asociadas a la inhalación y absorción dérmica de tóxicos de combustión.





Recomendaciones

- Implementar un programa institucional de uso obligatorio y supervisado del equipo de protección respiratoria, que incluya: verificación previa del sellado del SCBA, monitoreo del tiempo de exposición, capacitación continua sobre riesgos químicos y fisiopatología de inhalación tóxica.
- Establecer un sistema periódico de mantenimiento, calibración y reposición del EPP, utilizando protocolos técnicos basados en estándares internacionales (NFPA 1851 y NFPA 1981). Esto debe incluir registros de vida útil, inspecciones post-incendio y reemplazo inmediato de piezas deterioradas.
- Desarrollar procedimientos operativos normalizados (PON) para la descontaminación del personal y del equipo, incorporando prácticas como: duchas de descontaminación, lavado especializado de uniformes, prohibición de transportar EPP contaminado en cabinas de los vehículos, aplicación del modelo “clean cab”.
- Implementar un programa de vigilancia epidemiológica y monitoreo biológico, que permita identificar tempranamente lesiones pulmonares, alteraciones cardiovasculares y marcadores de exposición química. Esto implica exámenes médicos periódicos específicos para la actividad bomberil y seguimiento a largo plazo.
- Diseñar estrategias operativas para la reducción del tiempo de permanencia en zonas de alta toxicidad, mediante sistemas de rotación, equipos de relevo y la incorporación de sensores portátiles que midan concentraciones de gases y partículas en tiempo real.





- Fortalecer la formación técnica y científica del personal operativo, integrando contenidos sobre toxicología del fuego, fisiología del esfuerzo, lectura de humo, ventilación táctica y riesgos derivados de la combustión de materiales modernos.
- Actualizar los protocolos de intervención en incendios estructurales para incorporar criterios de evaluación del riesgo químico desde la fase inicial del incidente. El comandante de la escena debe contar con herramientas y lineamientos claros para la toma de decisiones sobre ingreso, permanencia y retirada del personal.
- Promover una cultura organizacional orientada a la seguridad, en la que prevalezca la prevención por encima de la rapidez operativa. Esto incluye campañas internas, reuniones de retroalimentación post-incendio y evaluaciones de desempeño enfocadas en prácticas seguras.

Referencias

Ministerio de Trabajo. (2024). Reglamento de Seguridad y Salud en el Trabajo (Decreto Ejecutivo N.o 255, 2 de mayo de 2024). Registro Oficial del Ecuador. Recuperado de <https://www.trabajo.gob.ec/reglamento-de-seguridad-y-salud-en-el-trabajo/>

Servicio Integrado de Seguridad ECU-911. (2022, 11 de noviembre). ECU 911 coordinó atención para 440 incendios estructurales en Pichincha, Napo y Orellana. Quito, Ecuador. Recuperado de <https://www.ecu911.gob.ec/ecu-911-coordino-atencion-para-440-incendios-estructurales-en-pichincha-napo-y-orellana/>





Guzmán Galarza, F. P., & Freire, A., & Gallegos, S. (2024). Estudio técnico del impacto del Decreto Ejecutivo 255 en el Ecuador tras un año de vigencia. GADE: Revista Científica, 5(1). DOI: <https://doi.org/10.63549/rg.v5i1.646>

Hwang, J., Xu, C., Grunsted, P., Agnew, R. J., Malone, T. R., Clifton, S., Thompson, K., & Xu, X. (2022). Urinary Metabolites of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Firefighters: A Systematic Review and Meta-Analysis. International Journal of Environmental Research and Public Health. Recuperado de <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35886320/>

Bonilla Campos, B. J. (2023). Identificación de riesgos en bomberos de Quito [Tesis de grado, Universidad Internacional SEK]. Repositorio UISEK.

Caux, C., O'Brien, C., & Viau, C. (2021). Exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons in firefighters. Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 18(6), 329–337. <https://doi.org/10.1080/15459624.2021.1880473>

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. (2015). Mortality and cancer incidence in a pooled cohort of U.S. firefighters from San Francisco, Chicago and Philadelphia (1950– 2009). Occupational and Environmental Medicine, 72(10), 699–706. <https://doi.org/10.1136/oemed-2014-102671>

Fent, K. W., Eisenberg, J., Evans, D. E., Sammons, D., Robertson, S., Striley, C., Snawder, J., Pleil, J. D., Stiegel, M. A., Mueller, C., Horn, G. P., & Dalton, J. (2014). Contamination of firefighter personal protective





equipment and skin with polycyclic aromatic hydrocarbons following controlled structure fires. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 11(3), D80–D91. <https://doi.org/10.1080/15459624.2013.858139>

Hwang, J., Lee, C., Park, H., & Kim, S. (2022). Meta-analysis of urinary biomarkers of exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons in firefighters. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(8), 4810. <https://doi.org/10.3390/ijerph19084810>

IARC (International Agency for Research on Cancer). (2022). IARC Monographs on the identification of carcinogenic hazards to humans, vol. 132: Occupational exposure as a firefighter. World Health Organization.

Keir, J. L., Kirkham, T. L., & Koehle, M. S. (2020). Exposure to benzene, toluene, ethylbenzene, and xylene (BTEX) among firefighters. *Environmental Health*, 19(1), 73–81. <https://doi.org/10.1186/s12940-020-00629-2>

Monrroy Parra, Á. E. (2022). Incidencia de síntomas respiratorios secundarios a la exposición de gases tóxicos en el personal operativo del Cuerpo de Bomberos de la ciudad de Daule [Tesis de grado, Universidad de las Américas]. Repositorio UDLA.

Oliveira, M. F., Santos, A. L., & Carvalho, A. C. (2020). Polycyclic aromatic hydrocarbons in firefighter protective clothing after controlled burns. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 31(12), 2448–2456. <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20200155>





Rodríguez, C. E., Pérez, L., & Mendes, J. (2019). Occupational exposure to toxic gases among Latin American firefighters: A regional perspective. *Revista de Salud Ocupacional Latinoamericana*, 12(3), 122–131.

Stec, A. A., Fent, K. W., & Kirkham, T. L. (2019). Firefighters' exposure to carcinogens: A systematic review. *Occupational Medicine*, 69(7), 461–468. <https://doi.org/10.1093/occmed/kqz085>

Barbosa, J. V., Farraia, M., Branco, P. T. B. S., Alvim-Ferraz, M. C. M., Martins, F. G.,

Annesi-Maesano, I., & Sousa, S. I. V. (2022). The effect of fire smoke exposure on firefighters' lung function: A meta-analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(24), 16799. <https://doi.org/10.3390/ijerph192416799>

González, L., Herrera, M., & Silva, P. (2020). Dinámica del fuego y factores estructurales en incendios urbanos. *Revista Latinoamericana de Gestión del Riesgo*, 12(3), 45–58.

Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2022). Proyecciones poblacionales y características territoriales del cantón Ibarra. INEC.

Municipio de Ibarra. (2023). Caracterización urbana y ordenamiento territorial del cantón Ibarra. Dirección de Planificación Territorial.

Ponce, J., & Ramírez, A. (2021). Riesgo estructural y comportamiento del fuego en ciudades andinas. *Revista de Ingeniería y Territorio*, 9(1), 67–82.

ECU-911. (2022). Coordinación de emergencias y reportes operativos anuales. Servicio Integrado de Seguridad ECU-911.





González, L., Herrera, M., & Silva, P. (2020). Dinámica del fuego y factores estructurales en incendios urbanos. *Revista Latinoamericana de Gestión del Riesgo*, 12(3), 45–58.

Municipio de Ibarra. (2023). Informe anual de gestión de riesgos y emergencias. Dirección de Seguridad y Gestión de Riesgos.

Ponce, J., & Ramírez, A. (2021). Riesgo estructural y comportamiento del fuego en ciudades andinas. *Revista de Ingeniería y Territorio*, 9(1), 67–82.

Austin, C., Hwang, J., & Fent, K. (2022). Occupational exposure to combustion by-products in structural firefighters. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 19(4), 219–230.

Fent, K., Eisenberg, J., Snawder, J., & Horn, G. (2020). Exposure characterization during interior and exterior fire suppression activities. *Fire Safety Journal*, 113, 103–119.

International Association of Fire Fighters. (2020). Best practices for reducing fireground exposures. IAFF.

Jankovic, J., & Caldwell, J. (2021). Ventilation strategies and exposure risks in structural fire response. *International Journal of Fire Science*, 15(2), 87–101.

Horn, G., Stewart, J., Kesler, R., & Fent, K. (2019). Combined toxicity of carbon monoxide and hydrogen cyanide during structural fires. *Toxicology and Industrial Health*, 35(6), 399–410.





Shen, H., Wang, Y., & Zhang, L. (2021). Formation of dioxins and furans during combustion of household materials. *Environmental Pollution*, 279, 116–128.

Staley, C., Boyd, J., & Carter, S. (2020). Particulate matter and heavy metal release during residential structure fires. *Atmospheric Environment*, 230, 117–145.

Ghazali, M. F., Salleh, M. N., & Rashid, R. A. (2021). Toxic gas emissions from polymer combustion: A review on fire smoke toxicity. *Journal of Hazardous Materials*, 416, 125–134.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125863>

Purser, D. A. (2022). Assessment of hazards to occupants from smoke, toxic gases and oxygen deficiency in fires. *Fire Safety Journal*, 128, 103–119.
<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2022.103551>

Reinhardt, T. E., & Ottmar, R. D. (2019). Baseline measurements of smoke exposure among wildland firefighters. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 16(11), 750–760.
<https://doi.org/10.1080/15459624.2019.1655273>

Fernando, S., Baker, D., & Meyer, C. (2021). Fire smoke exposure: Toxicological implications for firefighters. *Toxics*, 9(12), 1–18
<https://doi.org/10.3390/toxics9120340>

McAllister, S., & Weise, D. (2020). Fire behavior and smoke emissions: A comprehensive review of combustion products from structural materials. *Fire Technology*, 56(5), 2139–2161.
<https://doi.org/10.1007/s10694-020-00983-1>





Hejl, A. M., Potter, A., & Horn, G. P. (2020). Airborne contaminant behavior during structural fire ventilation tactics. *Fire Technology*, 56(6), 3051–3070. <https://doi.org/10.1007/s10694-020-01021-w>

Jankovic, J., Stull, J. O., & Moore, B. (2020). Chemical exposures and respiratory risk in structural firefighting. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 17(5), 205–217. <https://doi.org/10.1080/15459624.2020.1722994>

Alexander, B. M., & Baxter, C. S. (2022). Dermal exposure to combustion by-products in structural firefighters. *Annals of Work Exposures and Health*, 66(2), 220–233. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxab023>

Fent, K. W., Eisenberg, J., Evans, D. E., Sammons, D., & Robertson, S. (2017). Characterization of dermal exposure to smoke residues in firefighters. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 14(11), 801–810. <https://doi.org/10.1080/15459624.2017.1338063>

Fent, K. W., Toennis, C., & Sammons, D. (2020). Firefighters' absorption of contaminants during firefighting activities. *Toxicology Letters*, 331, 54–61. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2020.05.024>

Keir, J., Akhtar, A., & Kirkham, T. (2020). Contamination transfer and dermal exposure risks during fireground operations. *Fire Safety Journal*, 113, 102974. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.102974>

Horn, G. P., Stewart, J. W., Kesler, R. M., & Fent, K. W. (2018). Physiological responses of firefighters to fire suppression and recovery environments. *Ergonomics*, 61(3), 404–415. <https://doi.org/10.1080/00140139.2017.1369589>





Keir, J., Akhtar, A., & Kirkham, T. (2020). Contaminant transfer and exposure risks during firefighting overhaul operations. *Fire Safety Journal*, 113, 102974. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.102974>

Stec, A. A., Dickens, K., & Salden, M. (2018). Occupational exposure of firefighters to toxic combustion products. *Environment International*, 112, 49–57. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.08.025>

Anderson, D. A., Watkins, E. R., & Lukomski, M. (2019). Protective clothing degradation and firefighter exposure risk. *Journal of Protective Materials*, 12(3), 115–128.

Baxter, C. S., Ross, C. S., & Fabian, T. (2021). Thermal stress and increased dermal absorption of combustion toxins in firefighters. *Occupational Medicine*, 71(2), 95–104.

Fent, K. W., Evans, D. E., & Sammons, D. (2020). Firefighter exposure to smoke particulates and gases during structural firefighting. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 17(3), 111–122.

Gagliano, J., Stec, A. A., & Hull, T. R. (2018). Toxic fire effluents from modern household materials. *Fire Science Reviews*, 7(1), 1–22.

Horn, G. P., Kesler, R. M., & Fent, K. W. (2019). Contamination risks during overhaul and post-fire operations. *Fire Safety Journal*, 108, 102–118.

Keir, J., Kirkham, T., & Akhtar, A. (2020). Inhalation exposure patterns during urban fire suppression. *Environmental Health Perspectives*, 128(4), 470–480.





Stec, A. A., Dickens, K., & Salden, M. (2018). Firefighters' occupational exposure to toxic combustion products. *Environment International*, 112, 49–57.

