

Riesgos Emergentes en Seguridad y Salud en el Trabajo Asociados a la Manufactura Aditiva: Una Revisión Sistemática de Literatura

**Mariana Ruiz Vesga⁽¹⁾, Sergio Bayona Gómez⁽²⁾, Jairo Núñez Rodríguez⁽³⁾,
María Alexandra Malagón Torres⁽⁴⁾, Luis Gabriel Gutierrez Bernal⁽⁵⁾**

¹Estudiante Ingeniera Industrial (e). Universidad Pontificia Bolivariana (UPB), Bucaramanga, Colombia.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9426-5040>

²Docente Ingeniero Industrial, Fundación Universitaria Comfenalco Santander, Colombia.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6942-340X>

³Docente Ingeniero Industrial, Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga, Colombia.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4301-9081>

⁴Docente Fisioterapeuta, Politécnico Grancolombiano Bogotá, Colombia.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0415-1722>

⁵Docente Ingeniero Industrial, Corporación Universitaria Minuto de Dios Bogotá, Colombia.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3788-0104>

Correspondencia:

Luis Gabriel Gutierrez Bernal

Dirección postal: Corporación Universitaria Minuto de Dios
Bogotá, Colombia.

Correo electrónico: luis.gutierrez@uniminuto.edu

La cita de este artículo es: Mariana Ruiz Vesga et al. Riesgos Emergentes en Seguridad y Salud en el Trabajo Asociados a la Manufactura Aditiva: Una Revisión Sistemática de Literatura. Rev Asoc Esp Espec Med Trab 2026; 35(2):375-393

RESUMEN.

Antecedentes: Aunque la manufactura aditiva ha revolucionado la producción industrial y médica, su rápida adopción ha superado la capacidad para gestionar sus riesgos. El presente estudio analiza los riesgos emergentes en Seguridad y Salud en el Trabajo asociados a la manufactura aditiva a partir de la evidencia científica reciente.

Material y Métodos: revisión sistemática de la literatura bajo los lineamientos PRISMA 2020 y STROBE.

Resultados: Los hallazgos revelan una concentración de riesgos en las tecnologías FFF/FDM y PBF, donde materiales como el PLA, ABS y aleaciones metálicas (Ni, Ti, Co-Cr) dominan el

EMERGING OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH RISKS ASSOCIATED WITH ADDITIVE MANUFACTURING: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW

ABSTRACT

Background: Although additive manufacturing has revolutionized industrial and medical production, its rapid adoption has outpaced the ability to manage its risks. This study analyzes the emerging Occupational Health and Safety risks associated with additive manufacturing based on recent scientific evidence.

Materials and Methods: Systematic literature review following PRISMA 2020 and STROBE guidelines.

perfil de exposición. Se identificaron “peligros mixtos” en el 71,4% de la evidencia, confirmando que el riesgo no proviene de un contaminante aislado, sino de una interacción entre la degradación térmica del material y las condiciones de control del recinto.

Conclusiones: La prevención debe abandonar el enfoque reactivo basado en EPP, hacia controles integrales, contención desde el diseño, ventilación localizada y formación sobre la variabilidad química de cada proceso.

Palabras clave: seguridad y salud en el trabajo; riesgos emergentes; exposición ocupacional; bibliometría

Results: The findings reveal a concentration of risks in FFF/FDM and PBF technologies, where materials such as PLA, ABS, and metal alloys (Ni, Ti, Co-Cr) dominate the exposure profile. “Mixed hazards” were identified in 71.4% of the evidence, confirming that the risk does not come from a single contaminant, but from an interaction between material thermal degradation and enclosure control conditions.

Conclusions: Prevention should move away from a reactive approach based on PPE, toward integral controls, containment by design, localized ventilation, and training on the chemical variability of each process.

Keywords: occupational safety and health; emerging risks; occupational exposure; bibliometrics.

Fecha de recepción: 20 d

Fecha de aceptación: 9 de junio de 2025

Introducción

La Manufactura Aditiva (MA), popularmente denominada impresión 3D, ha trascendido su rol inicial como herramienta de prototipado rápido para convertirse en un pilar de la producción industrial personalizada. Su capacidad para materializar geometrías complejas mediante la adición selectiva de capas ha permitido optimizar cadenas de suministro y democratizar el diseño digital^(1,2). No obstante, esta expansión acelerada ha generado un fenómeno crítico: la tecnología ha evolucionado con mayor rapidez que nuestra comprensión sobre sus implicaciones en la Salud y Seguridad en el Trabajo (SST). El entorno laboral ya no solo se compone de máquinas, sino de una

interacción dinámica y a menudo impredecible entre equipos, operarios y una diversidad creciente de materiales reactivos.

Para la gestión del riesgo laboral, es un error conceptual abordar la manufactura aditiva como un proceso monolítico. En realidad, constituye un ecosistema heterogéneo donde convergen filamentos termoplásticos, resinas fotosensibles, polvos metálicos micrométricos y una amplia gama de agentes químicos de limpieza⁽³⁾. Esta diversidad demanda un análisis de riesgo diferenciado, que considere no solo el estado físico inicial del material, sino su transformación química bajo fuentes de alta energía, radiación UV o temperaturas de extrusión extremas, tal como lo sugieren las normativas internacionales emergentes en la materia^(2,4).

La evidencia científica reciente ha comenzado a desmitificar la supuesta inocuidad de estos procesos. En las tecnologías de extrusión de material más comunes como el Modelado por Deposición Fundida (FDM) y Fabricación por Filamento Fundido (FFF), el calentamiento de filamentos poliméricos actúa como un reactor químico que libera partículas ultrafinas (UFP) y compuestos orgánicos volátiles (COV), cuya tasa de emisión es altamente sensible a variables como la temperatura del extrusor y la eficiencia del intercambio de aire en el recinto⁽⁵⁾. Por otro lado, en los procesos de fusión en lecho de polvo metálico (PBF), el foco preventivo se desplaza hacia la manipulación física de polvos reactivos y las tareas de mantenimiento, donde la exposición a metales de alta relevancia toxicológica como el níquel, titanio o cobalto-cromo ocurre principalmente a través de la inhalación de partículas respirables y la contaminación secundaria de superficies⁽⁶⁾. Este escenario de riesgo se complejiza aún más con las tecnologías basadas en resinas. Aquí, la amenaza no se limita a la fase de impresión; se extiende al contacto dérmico con acrilatos sin curar, la inhalación de vapores durante el lavado con solventes y la desgaseificación química de las piezas durante su almacenamiento inicial^(7,8). Por lo tanto, el vacío de conocimiento actual no reside únicamente en la detección de contaminantes, sino en la comprensión de la sinergia entre tecnología, material y protocolos de control. Bajo esta premisa, el presente artículo tiene como objetivo analizar los riesgos emergentes en SST vinculados a la manufactura aditiva, sintetizando la evidencia científica más reciente para proponer marcos preventivos adaptados a la realidad industrial contemporánea⁽⁹⁾.

Metodología

Diseño de la revisión

El estudio se desarrolló bajo un enfoque de revisión sistemática de literatura, enfocada a identificar y condensar la evidencia sobre riesgos emergentes de seguridad y salud en el trabajo

asociados a la manufactura aditiva. Este tipo de revisión permite establecer un procedimiento explícito de búsqueda, selección, extracción y síntesis de información, reduciendo la subjetividad propia de revisiones narrativas y favoreciendo la trazabilidad de las decisiones metodológicas^(9,10). La metodología se estructuró tomando como referencia el enfoque propuesto por Tranfield, Denyer y Smart, quienes plantean la revisión sistemática como un proceso útil para construir conocimiento basado en evidencia mediante etapas de planificación, ejecución y reporte⁽⁹⁾. Asimismo, el proceso de identificación, cribado e inclusión se organizó según los lineamientos PRISMA 2020, con el fin de presentar de manera clara el flujo de registros identificados, documentos evaluados y estudios incluidos⁽¹⁰⁾.

Estrategia de búsqueda

La búsqueda bibliográfica se realizó en Scopus, debido a su cobertura de literatura científica revisada por pares en áreas relacionadas con ingeniería, manufactura, higiene industrial, salud ocupacional y seguridad en el trabajo. La ventana temporal se delimitó entre 2020 y 2026, con el propósito de concentrar la revisión en literatura reciente y en riesgos asociados a los procesos de la manufactura aditiva moderna^(9,10). La ecuación de búsqueda utilizada fue la siguiente:

TITLE-ABS-KEY [[additive manufactur* OR 3D print*]] AND TITLE-ABS-KEY [“occupational health” OR “occupational safety” OR OSH OR OHS OR workplace OR “industrial hygiene” OR ergonom* OR “risk assessment”] AND PUBYEAR > 2019 AND PUBYEAR < 2027.

Como resultado de esta estrategia se identificaron 235 registros, los cuales fueron exportados a una matriz en Excel para su depuración y análisis.

Criterios de inclusión y exclusión

Se incluyeron artículos científicos que trataran los procesos de manufactura aditiva o impresión 3D y que presentaran información relacionada con

seguridad y salud laboral, exposición laboral, emisiones, partículas, compuestos orgánicos volátiles, polvos metálicos, sustancias químicas, consecuencias para la salud, vías de exposición, controles preventivos o evaluación de riesgos. Estos criterios se definieron de acuerdo con el objetivo de la revisión y la necesidad de conservar documentos que aportaran información verificable y relevante para la matriz de análisis.

Se excluyeron documentos sin relación directa con seguridad y salud en el trabajo, artículos centrados únicamente en propiedades mecánicas, diseño de piezas, optimización de parámetros, desempeño de producto o aplicaciones biomédicas sin análisis de exposición ocupacional. También fueron excluidos documentos sin acceso suficiente al contenido necesario para completar la matriz de análisis o que no permitieran identificar peligros concretos asociados al proceso de manufactura aditiva.

Proceso de selección de estudios

El proceso de selección se desarrolló en dos etapas. En la primera se examinaron los títulos y resúmenes de los 235 registros identificados en Scopus, con el propósito de determinar su relación inicial con la manufactura aditiva y la seguridad y salud en el trabajo. Como resultado de esta revisión preliminar se preseleccionaron 109 artículos, siguiendo una lógica de cribado compatible con el reporte PRISMA 2020^(10,11).

En la segunda etapa se verificó el acceso al documento completo y la pertinencia real del contenido frente al objetivo de la revisión. Durante esta fase se revisó si cada documento aportaba información útil sobre peligros, rutas de exposición, consecuencias, controles o condiciones de riesgo asociadas a manufactura aditiva o impresión 3D. Finalmente, el corpus quedó conformado por 49 artículos incluidos y analizados en la revisión sistemática^(10,11).

En esta revisión, cada artículo incluido fue tratado como un estudio independiente; por esta razón, el número de reportes incluidos corresponde con el número de estudios incluidos en la síntesis final.

Extracción y organización de la información

La información de los artículos incluidos se organizó en una matriz de análisis elaborada en Excel. En esta matriz se registraron datos bibliográficos y variables técnicas relacionadas con el objetivo de la revisión: título, autores, año, fuente, tecnología de manufactura aditiva, materiales empleados, área de aplicación, etapa del proceso donde se presenta el riesgo, peligro identificado, ruta de exposición, consecuencia potencial y medidas de control^(9,10).

Para garantizar la trazabilidad, cada artículo incluido recibió una numeración consecutiva de acuerdo con el orden definido en la matriz final. Esta numeración se utilizó en las tablas de resultados, de modo que cada categoría pudiera verificarse directamente con los artículos que la sustentan. Así, los resultados no se presentan únicamente como cantidades y porcentajes, sino también mediante los números de artículos asociados a cada variable.

Clasificación de los peligros

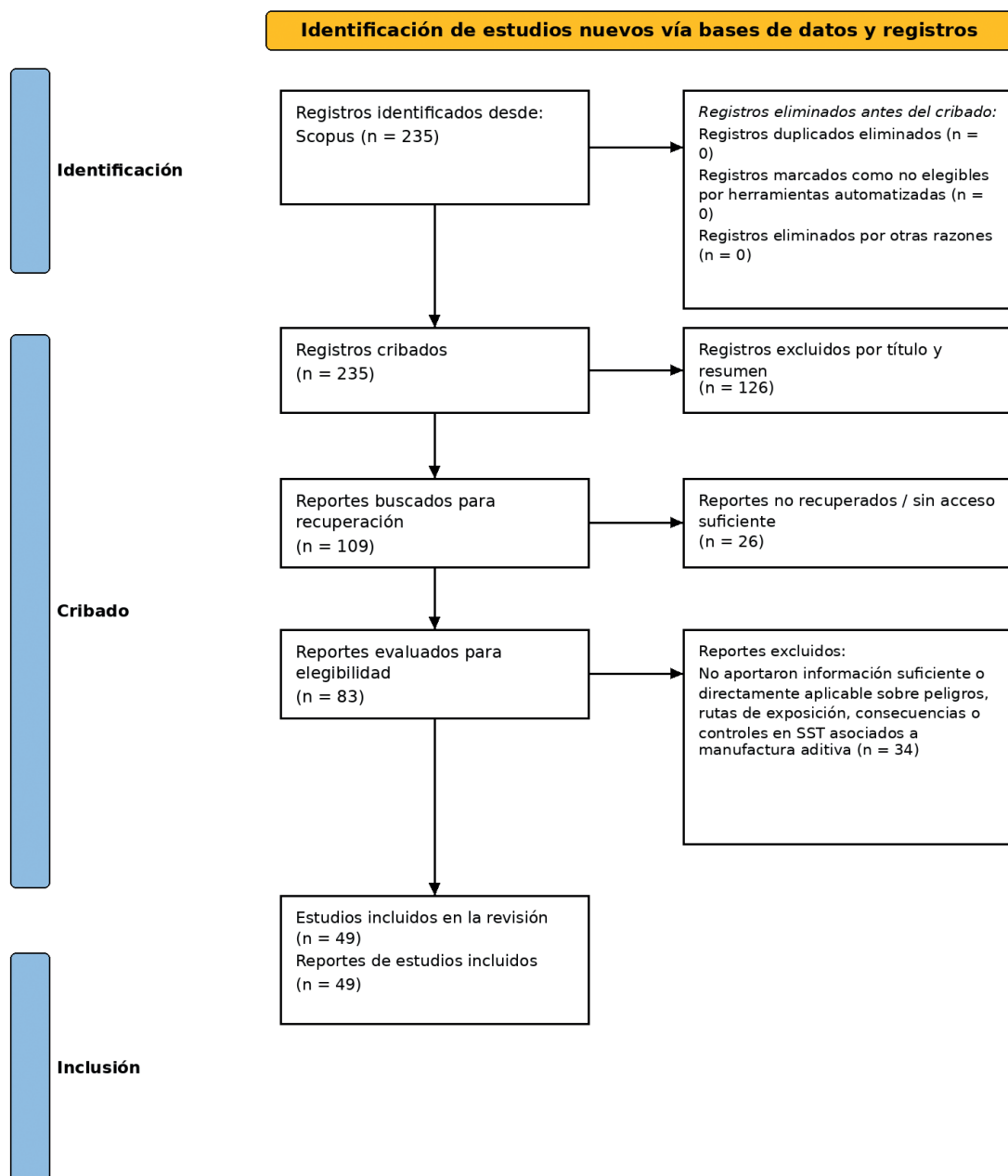
Los peligros identificados fueron clasificados de acuerdo con el tipo de riesgo predominante reportado en cada estudio. Esta clasificación permitió agrupar la evidencia en categorías relacionadas con partículas y nanopartículas, sustancias químicas y compuestos orgánicos volátiles, polvos metálicos, incendio o explosión y peligros mixtos, siguiendo la orientación de normas internacionales sobre ambiente, salud y seguridad en manufactura aditiva y nanomateriales.

La clasificación se apoyó en normas internacionales relacionadas con ambiente, salud y seguridad en manufactura aditiva y nanomateriales. ISO 27548:2024 aborda métodos para determinar emisiones de partículas y compuestos químicos en impresoras 3D de escritorio por extrusión de material⁽³⁾; ISO/ASTM 52933:2024 se enfoca en sustancias peligrosas emitidas por impresoras de extrusión de material en lugares no industriales⁽¹²⁾; ISO/ASTM 52931:2023 establece principios generales de ambiente, salud y seguridad para

FIGURA 1. DIAGRAMA PRISMA 2020 DEL PROCESO.

Diagrama de flujo PRISMA 2020 del proceso de selección de estudios

Identificación de nuevos estudios mediante bases de datos y registros



Nota. En esta revisión, cada artículo incluido fue tratado como un estudio independiente; por tanto, el número de estudios incluidos coincide con el número de reportes incluidos.

Fuente: elaboración propia con base en PRISMA 2020 (Page et al., 2021) y en la matriz final de selección de artículos.

el uso de materiales metálicos en manufactura aditiva⁽¹⁾; ISO/ASTM 52938-1:2025 aborda requisitos de seguridad para máquinas PBF-LB con polvos metálicos⁽⁴⁾; e ISO/TS 12901-2 orienta la gestión de riesgos por exposición ocupacional a nano-objetos mediante control por bandas⁽¹³⁾.

Cuando un artículo abordaba más de un peligro, la clasificación se realizó considerando el riesgo principal o más representativo del estudio. En los casos en que el documento integraba simultáneamente diferentes tipos de exposición, como partículas, vapores químicos, polvos metálicos, inflamabilidad o condiciones organizacionales, se clasificó dentro de peligro mixto.

Evaluación de calidad del reporte mediante STROBE

La calidad del reporte de los 49 artículos incluidos se evaluó mediante ítems seleccionados del STROBE Checklist for cross-sectional studies, tomado de la página oficial de STROBE⁽¹⁴⁾. Este checklist fue elegido considerando que varios documentos del corpus corresponden a mediciones de exposición, caracterización ambiental, evaluaciones de condiciones de trabajo o estudios con enfoque transversal^(14,15). No obstante, debido a que la muestra también incluye revisiones técnicas, evaluaciones de riesgo y estudios experimentales sin participantes humanos, la lista no fue aplicada de manera completa ni rígida.

Los ítems seleccionados permitieron valorar si cada artículo reportaba de forma suficiente su objetivo, diseño, contexto, variables, fuentes de datos o medición, tratamiento de datos, resultados, limitaciones, interpretación y financiación. Cada criterio fue clasificado como cumple, cumple parcialmente, no cumple o no aplica. Para la síntesis cuantitativa se asignó un punto a los criterios cumplidos, medio punto a los parcialmente cumplidos y cero puntos a los no cumplidos; los ítems no aplicables se excluyeron del denominador^(14,15).

La evaluación STROBE se utilizó como guía de transparencia del reporte y no como criterio de exclusión. Por tanto, su propósito fue apoyar

la lectura crítica de la evidencia y reconocer limitaciones del corpus, no modificar el número final de artículos incluidos.

Procedimiento de síntesis y trazabilidad de la información

La síntesis de la información se desarrolló a partir de la matriz final de 49 artículos. En lugar de plantear un análisis estadístico inferencial, el procedimiento se orientó a organizar y comparar la evidencia mediante categorías descriptivas relacionadas con tecnología de impresión, material, área de aplicación y peligro predominante. Esta decisión metodológica responde a la heterogeneidad del corpus, dado que los estudios incluidos difieren en diseño, escala, instrumentos de medición, tipo de material y condiciones de operación.

Las variables de tecnología, materiales y áreas de aplicación se trataron como categorías no excluyentes, debido a que un mismo artículo podía abordar varias tecnologías, comparar diferentes materiales o presentar aplicaciones múltiples. Por esta razón, los porcentajes de estas tablas expresan la proporción de artículos del corpus final que reportan cada categoría, pero no deben interpretarse como una distribución mutuamente excluyente. En contraste, la clasificación de peligros se organizó como categoría principal por artículo, con el fin de identificar el riesgo predominante dentro de cada estudio.

Para reforzar la trazabilidad, las tablas de resultados incorporan los números de los artículos finales asociados a cada categoría. Esta forma de presentación permite verificar de manera directa qué documentos sustentan cada resultado y evita que la revisión se limite a una lectura agregada de frecuencias. Posteriormente, cada tabla fue interpretada considerando la relación entre tecnología, material, etapa del proceso y medidas de control reportadas.

Resultados

Selección de artículos incluidos

La búsqueda inicial permitió identificar 235 registros en Scopus. Luego del cribado por

título y resumen se excluyeron 126 registros y se preseleccionaron 109 documentos para recuperación. De estos, 26 no fueron recuperados o no contaban con acceso suficiente para completar la revisión de texto completo. En consecuencia, 83 reportes fueron evaluados en detalle y 34 fueron excluidos por no cumplir los criterios finales de inclusión. La muestra final quedó conformada por 49 estudios incluidos en la revisión sistemática, reportados mediante la estructura PRISMA 2020^(10,11).

Este proceso de selección muestra que la reducción del corpus no se debió únicamente a restricciones de acceso, sino también a la necesidad de conservar documentos con información directamente aplicable a seguridad y salud en el trabajo. En particular, se priorizaron estudios que permitieran reconocer peligros, rutas de exposición, consecuencias o controles, debido a que estas variables constituían el eje de la matriz de análisis.

Calidad del reporte según STROBE

La evaluación STROBE se aplicó a los 49 artículos incluidos sin modificar la selección final. En términos generales, 44 artículos presentaron calidad de reporte alta, 5 calidad media y ninguno fue clasificado con calidad baja. El cumplimiento promedio fue de 90,3%, lo que indica que la mayoría de los documentos proporciona información suficiente para sustentar la extracción de datos y la síntesis de resultados^(14,15).

Los ítems con mejor desempeño fueron antecedentes, datos de resultado, interpretación, variables y resultados clave. Esto significa que los artículos incluidos justifican adecuadamente la relevancia de la manufactura aditiva en relación con la exposición ocupacional, definen de manera suficiente los contaminantes o variables de interés y presentan hallazgos útiles para interpretar los riesgos. En cambio, los aspectos más débiles fueron la declaración explícita de sesgos o incertidumbres, las limitaciones y, en menor medida, la financiación o conflictos de

interés. Esta tendencia es importante porque en estudios de emisiones y exposición las condiciones de ventilación, tamaño del recinto, modelo de impresora, número de mediciones, variabilidad del material y límites de detección pueden modificar sustancialmente la interpretación de los resultados. Tabla 1.

La lectura de STROBE no debe entenderse como una calificación clínica o epidemiológica estricta, sino como una valoración de transparencia del reporte adaptada a estudios técnicos de manufactura aditiva. En ese sentido, los porcentajes permiten resumir el grado de completitud de la información, pero la interpretación de cada artículo siguió considerando su diseño particular.

Tecnologías de manufactura aditiva identificadas

La distribución por tecnología evidencia que la literatura reciente sobre riesgos ocupacionales se concentra principalmente en procesos de extrusión de material y tecnologías basadas en lecho de polvo. Este resultado es coherente con la expansión simultánea de impresoras FFF/FDM en entornos no industriales y de sistemas PBF en manufactura avanzada. Las categorías de esta tabla no son excluyentes, debido a que algunos artículos analizan más de una tecnología o presentan revisiones multitecnológica.

FFF/FDM fue la tecnología más frecuente, con 27 artículos, equivalente al 55,1% del corpus final. Su presencia no solo responde a su disponibilidad comercial, sino también a que se usa en espacios con distintos niveles de control: hogares, aulas, laboratorios universitarios, bibliotecas, talleres de prototipado y pequeñas unidades productivas. En estos contextos, el riesgo puede subestimarse porque los equipos son compactos y fáciles de operar; sin embargo, los estudios sobre FFF/FDM muestran emisiones de partículas ultrafinas y COV asociadas al calentamiento de filamentos, con variaciones importantes según material, temperatura, ventilación y condiciones de operación^(5,16,17).

PBF apareció en 23 artículos, equivalente al 46,9%. En esta tecnología, el punto crítico no

TABLA 1. RESUMEN DE CUMPLIMIENTO POR ÍTEM STROBE EN LOS ARTÍCULOS INCLUIDOS.

Ítem	Criterio	Cumple	Cumple Parcialmente	No cumple	No aplica	Aplicables	Cumplimiento
I1	Título y resumen	34	15	0	0	49	84,7%
I2	Antecedentes / justificación	49	0	0	0	49	100,0%
I3	Objetivos	47	2	0	0	49	98,0%
I4	Diseño del estudio	41	8	0	0	49	91,8%
I5	Contexto	39	10	0	0	49	89,8%
I7	Variables	48	1	0	0	49	99,0%
I8	Fuentes de datos / medición	39	10	0	0	49	89,8%
I9	Sesgos / incertidumbre	2	41	6	0	49	45,9%
I10	Tamaño del estudio	46	2	0	1	48	97,9%
I11	Variables cuantitativas	35	6	0	8	41	92,7%
I12	Métodos estadísticos	32	11	0	6	43	87,2%
I15	Datos de resultado	49	0	0	0	49	100,0%
I18	Resultados clave	48	1	0	0	49	99,0%
I19	Limitaciones	37	9	3	0	49	84,7%
I20	Interpretación	49	0	0	0	49	100,0%
I22	Financiación / conflicto de interés	43	0	6	0	49	87,8%

Nota: Elaboración propia a partir de matriz de Excel de cumplimiento STROBE

se limita a la fusión del material dentro de la máquina, sino que se extiende a la preparación del polvo, carga de material, recuperación de polvo no sinterizado, limpieza de cámara, retiro de piezas y posprocesado. Interpreto que la hegemonía de la tecnología FFF/FDM responde no solo a su disponibilidad, sino a

una “comodidad” peligrosa: su masificación en entornos no industriales (aulas, oficinas) ha invisibilizado el hecho de que el extrusor actúa como un reactor químico, mientras que el PBF, por su naturaleza industrial, ha forzado una mayor vigilancia técnica debido a la volatilidad de sus insumos metálicos. Tabla 2.

TABLA 2. DISTRIBUCIÓN DE ARTÍCULOS POR TECNOLOGÍA DE IMPRESIÓN.

Tecnología	Artículos finales (apéndice A)	Cantidad	% sobre 49 artículos
FFF / FDM [Fused Filament Fabrication / Fused Deposition Modeling]	2, 3, 4, 6, 7, 8, 10, 12, 16, 17, 19, 20, 22, 23, 24, 25, 27, 29, 32, 34, 35, 37, 38, 40, 43, 46, 48	27	55,1%
PBF – Powder Bed Fusion [SLM / SLS / L-PBF / EBM]	4, 5, 7, 8, 11, 12, 15, 19, 21, 24, 26, 27, 28, 30, 31, 35, 39, 41, 44, 45, 47, 48, 49	23	46,9%
DED – Directed Energy Deposition [WAAM / LMD / DLD]	1, 4, 7, 8, 9, 15, 33, 35, 39	9	18,4%
BJ – Binder Jetting	4, 7, 13, 17, 24, 31, 35, 36	8	16,3%
VP – Vat Photopolymerization [SLA / DLP] y Material Jetting [MJ]	4, 7, 10, 14, 17, 19, 35, 42, 48	9	18,4%
Múltiples tecnologías / General AM [artículo no especifica una sola]	4, 7, 8, 10, 12, 15, 17, 18, 19, 24, 27, 31, 35, 39, 48	15	30,6%

Nota: Elaboración propia a partir de la matriz de extracción de datos de los 49 estudios incluidos en la revisión sistemática.

Materiales asociados a los estudios revisados

El análisis por materiales confirma que los riesgos en manufactura aditiva no se originan únicamente en la máquina, sino en la interacción entre la naturaleza del material, la temperatura o energía aplicada, la forma física del insumo y la operación realizada. Por ello, un mismo equipo puede presentar perfiles de exposición distintos cuando cambia el filamento, el polvo, la resina o el procedimiento de limpieza. Las categorías son no excluyentes porque varios artículos comparan materiales o trabajan con familias amplias de insumos.

Los polvos y metales fueron reportados en 27 artículos, equivalentes al 55,1%. Esta categoría agrupa aceros, aleaciones de titanio, níquel, cobalto-cromo, aluminio y otros materiales usados principalmente en PBF, DED o procesos relacionados. Su relevancia ocupacional se debe a que la exposición puede ocurrir durante tareas manuales que no siempre coinciden con la fase de impresión: carga, recuperación, tamizado, limpieza, retiro de piezas o mantenimiento. En estos casos, la masa total de polvo no es el único criterio de interés; también importan

el tamaño de partícula, la composición de la aleación y la posibilidad de contacto respiratorio o dérmico^(18,19,20).

En los materiales poliméricos, PLA y ABS aparecen como los insumos más frecuentes, con 17 y 16 artículos respectivamente. Esta concentración corresponde al predominio de FFF/FDM dentro del corpus. Aunque PLA suele considerarse una opción comparativamente menos problemática que ABS, la evidencia revisada indica que no debe asumirse como material libre de riesgo, porque las emisiones dependen de temperatura, colorantes, aditivos, geometría de impresión, tiempo de operación y ventilación^(5,16). En ABS, la preocupación se relaciona de forma más marcada con partículas submicrométricas, estireno y otros compuestos generados por degradación térmica. Las resinas fotopoliméricas y poliamidas amplían el perfil de exposición hacia vapores, acrilatos, solventes, sensibilización dérmica y polvo durante posprocesado⁽¹⁶⁾. El predominio de metales en las investigaciones ratifica que el desafío actual de la higiene industrial en manufactura aditiva ya no es solo la toxicidad química convencional, sino la gestión de nanopartículas incidentales

TABLA 3. DISTRIBUCIÓN DE ARTÍCULOS POR TIPO DE MATERIAL

Material	Artículos finales (apéndice A)	Cantidad	% sobre 49 artículos
PLA [Ácido Poliláctico]	2, 6, 10, 12, 16, 17, 20, 25, 27, 29, 32, 34, 35, 38, 40, 43, 46	17	34,7%
ABS [Acilonitrilo Butadieno Estireno]	6, 10, 12, 16, 17, 20, 24, 25, 27, 29, 32, 34, 35, 38, 43, 48	16	32,7%
Polvos/metales en MA [aceros, Co-Cr, Ti-6Al-4V, Ni, Al y otras aleaciones]	1, 4, 5, 7, 8, 9, 11, 15, 16, 17, 19, 21, 22, 24, 26, 27, 28, 29, 31, 33, 35, 39, 41, 44, 45, 47, 49	27	55,1%
PEEK / Polímeros de alto rendimiento [PI, Ultem, PC, PSU, PPS]	3, 27, 29, 35	4	8,2%
Resinas fotopoliméricas [fotopolímeros VP / MJ]	4, 10, 14, 17, 24, 27, 35, 36, 42, 48	10	20,4%
Nanocompuestos / Nano-aditivos [AgNP, SPION, Fe ₃ O ₄ , ZnO, CNT]	9, 12, 14, 16, 22, 23, 29	7	14,3%
TPU / Elastómeros termoplásticos y polímeros flexibles	16, 22, 23, 29, 38, 40	6	12,2%
PA / Nylon [Poliamida]	7, 16, 22, 23, 24, 27, 29, 30, 35, 40, 48	11	22,4%
PMMA [Polimetilmetacrilato]	36	1	2,0%
Hormigón / Cemento y materiales cementicios	7	1	2,0%
Biomateriales / Bioimpresión	14, 37	2	4,1%
Múltiples / No especificado / General	4, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 23, 24, 25, 27, 29, 32, 34, 35, 36, 38, 40, 42, 43, 48	29	59,2%

Nota: Elaboración propia a partir de la matriz de extracción de datos de los 49 estudios incluidos en la revisión sistemática.

cuya reactividad es aún una frontera en estudio. Tabla 3.

Áreas de aplicación de la manufactura aditiva

La clasificación por área de aplicación permite reconocer en qué contextos se está investigando con mayor frecuencia la relación entre manufactura aditiva y seguridad y salud en el trabajo. La categoría dominante fue higiene ocupacional, evaluación de emisiones y exposición laboral, con 46 artículos, equivalente al 93,9% del conjunto final. Esto confirma que el corpus seleccionado responde directamente al objetivo de la revisión,

porque la mayoría de los documentos aporta datos sobre contaminantes, medición ambiental, exposición del operador o gestión preventiva.

La manufactura industrial y la producción general también tuvieron una presencia importante, con 31 artículos. Este resultado es relevante porque la transición desde prototipado ocasional hacia producción repetitiva modifica la magnitud del riesgo: aumenta el tiempo de operación, la cantidad de material procesado, el número de tareas de limpieza y la posibilidad de exposición acumulada. En ambientes industriales, además, la exposición no depende solo de una máquina,

sino del flujo completo de trabajo y de la forma como se integran almacenamiento, impresión, posprocesado y mantenimiento^(6,21).

Las áreas de educación, entornos no industriales y gestión de ciclo de vida tuvieron menor frecuencia, pero no deben considerarse secundarias desde el punto de vista preventivo. En espacios académicos o domésticos puede existir menor percepción de riesgo, menor uso de extracción localizada y menor formalización de procedimientos de limpieza. Por otra parte, los estudios vinculados con reciclaje y sostenibilidad advierten que triturar, extruir o reutilizar polímeros puede generar nuevas fuentes de partículas y vapores, por lo que la evaluación de sostenibilidad debe incluir también la exposición ocupacional⁽²²⁾. Al observar esta disparidad, concluyo que la ciencia actual prioriza un enfoque reactivo centrado en “lo que el trabajador respira”, dejando en un segundo plano factores humanos vitales como la carga física o el diseño de las estaciones. Esto representa un vacío de conocimiento que las futuras guías técnicas en países como Colombia no deben ignorar si buscan una protección integral del operario. Tabla 4.

Clasificación de peligros identificados

La clasificación de peligros fue tratada como mutuamente excluyente, de modo que cada artículo se ubicó en una categoría principal según el peligro predominante. Esta decisión permitió establecer una lectura global del corpus sin desconocer que varios documentos describen más de un peligro. La categorización se apoyó en lineamientos internacionales sobre emisiones, materiales metálicos, seguridad en máquinas PBF-LB y gestión de nano-objetos^(1,3,4,12,13).

La categoría de peligro mixto fue la más frecuente, con 35 artículos, equivalente al 71,4%. Este hallazgo es central para la interpretación de la revisión, porque muestra que la manufactura aditiva rara vez genera un escenario de exposición simple. Una misma operación puede combinar partículas ultrafinas, COV, polvos metálicos, vapores de resina, contaminación superficial,

riesgos de inflamabilidad, exposición dérmica y factores organizacionales asociados a limpieza, capacitación o disponibilidad de ventilación. Por tanto, clasificar estos estudios como mixtos no significa falta de precisión, sino reconocimiento de la complejidad real del proceso^(6,7).

La segunda categoría fue partículas y nanopartículas, con 11 artículos, equivalente al 22,4%. Esta concentración confirma la importancia de la exposición inhalatoria a partículas ultrafinas y nanomateriales incidentales, especialmente en FFF/FDM, procesos metálicos y actividades de posprocesado^(21,23,24). Las categorías de sustancias químicas y COV, polvos metálicos e incendio/explosión aparecen con menor frecuencia como peligro predominante individual; sin embargo, ello no implica baja relevancia, sino que estos peligros suelen aparecer combinados dentro de escenarios mixtos, como ocurre con resinas, polvos metálicos o procesos multitecnología^(7,25). Este hallazgo constituye el corazón de la investigación y permite concluir que los protocolos de gestión de riesgos aislados han quedado obsoletos. Un operario de manufactura aditiva está inmerso en un “cóctel” de amenazas interdependientes que invalidan cualquier estrategia de seguridad que no integre controles de ingeniería, ventilación y formación técnica de manera sinérgica. Tabla 5 y Tabla 6.

Rutas de exposición, consecuencias y controles

Las rutas de exposición identificadas se relacionan principalmente con inhalación de partículas, nanopartículas, vapores, carbonilos y compuestos orgánicos volátiles. Esta ruta es crítica durante la operación de impresoras FFF/FDM, el manejo de polvos en PBF y DED, la limpieza de cámaras, el retiro de piezas, el tamizado, la recuperación de material y el uso de solventes o resinas^(6,16,21). La inhalación no depende únicamente de la emisión generada; también está condicionada por ventilación, volumen del recinto, número de equipos operando, duración de la tarea, distancia a la fuente y permanencia del trabajador en el área.

TABLA 4. DISTRIBUCIÓN DE ARTÍCULOS POR ÁREA DE APLICACIÓN.

Área de aplicación	Artículos finales (Apendice A)	Cantidad	% sobre 49 artículos
Higiene ocupacional / Evaluación de emisiones y exposición laboral	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49	46	93,9%
Manufactura industrial / Producción general	1, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 23, 24, 26, 28, 30, 31, 33, 35, 36, 39, 41, 44, 45, 47, 49	31	63,3%
Dispositivos médicos y aplicaciones clínicas	14, 37	2	4,1%
Ergonomía / Diseño centrado en el trabajador	4, 10, 18, 30, 37	5	10,2%
Educación / Entornos no industriales [escuelas, universidades, hogares]	18, 20, 30, 46	4	8,2%
Gestión fin de vida / Ciclo de vida AM	9, 12, 19, 22, 23, 43	6	12,2%
Aeroespacial / Defensa	3, 8	2	4,1%
Seguridad digital / Ciberseguridad en AM	8	1	2,0%
Marina / Naval	7	1	2,0%

Nota: Elaboración propia a partir de la matriz de extracción de datos de los 49 estudios incluidos en la revisión sistemática.

El contacto dérmico también aparece como una ruta relevante, especialmente en estudios sobre polvos metálicos, resinas, superficies contaminadas y procesos de posprocesado. Esta exposición puede subestimarse cuando la evaluación se centra solo en mediciones del aire. En tecnologías metálicas, el polvo depositado sobre superficies, guantes o estaciones de trabajo puede generar transferencia secundaria; en tecnologías con resinas, el contacto con fotopolímeros, acrilatos o solventes puede relacionarse con irritación, sensibilización o dermatitis ocupacional^(7,20). Bajo un análisis riguroso, esta dualidad de rutas es a menudo subestimada en los entornos laborales; se tiende a priorizar la calidad del aire respirable mientras se ignora que las superficies contaminadas y la transferencia secundaria desde guantes o herramientas actúan como depósitos permanentes de agentes sensibilizantes y tóxicos. En cuanto a las consecuencias, los estudios

analizados reportan un espectro que transita desde irritaciones respiratorias agudas y síntomas de asma hasta preocupaciones crónicas por carcinogenicidad sistémica y disfunción cardiovascular vinculada a la translocación de nanopartículas incidentales. Se interpreta que el verdadero desafío para la salud ocupacional no es solo la toxicidad de un contaminante específico, como el estireno o el níquel, sino el efecto sinérgico de las mezclas complejas. La literatura actual sugiere que la exposición a este “cóctel” de emisiones genera una incertidumbre preventiva tal, que las consecuencias para la salud no deben tratarse como probabilidades estadísticas, sino como amenazas latentes que exigen una vigilancia epidemiológica mucho más proactiva y de largo plazo.

Finalmente, la efectividad de las medidas de control reportadas evidencia una dependencia excesiva en los Elementos de Protección Personal

TABLA 5. CLASIFICACIÓN DE PELIGROS OCUPACIONALES IDENTIFICADOS EN MANUFACTURA ADITIVA.

Clasificación	Uso en la revisión	Norma[s] base	Artículos finales (ApendiceA)	Cantidad	%
Partículas y nanopartículas	Artículos cuyo peligro principal corresponde a emisión, medición o exposición a partículas ultrafinas, nanopartículas o nanomateriales incidentales durante impresión, postproceso o actividades relacionadas.	ISO 27548:2024; ISO/ASTM 52933:2024; ISO/TS 12901-2:2026	Art. 1, Art. 9, Art. 26, Art. 28, Art. 33, Art. 39, Art. 40, Art. 41, Art. 44, Art. 46, Art. 47	11	22,4%
Sustancias químicas y COV [Compuestos Orgánicos Volátiles]	Artículos cuyo peligro principal corresponde a emisiones químicas, vapores, gases, solventes, monómeros, carbonilos o compuestos orgánicos volátiles.	ISO 27548:2024; ISO/ASTM 52933:2024	Art. 6	1	2,0%
Polvos metálicos	Artículos cuyo peligro principal se asocia al manejo, dispersión o contaminación por polvos metálicos usados como materia prima en manufactura aditiva.	ISO/ASTM 52931:2023; ISO/ASTM 52938-1:2025	Art. 5	1	2,0%
Incendio y explosión	Artículos cuyo peligro principal corresponde a inflamabilidad, combustión espontánea o explosividad de polvos y materiales usados en manufactura aditiva.	ISO/ASTM 52931:2023; ISO/ASTM 52938-1:2025	Art. 21	1	2,0%
Mixto	Artículos que integran dos o más peligros relevantes al mismo tiempo, por ejemplo partículas, COV, polvos metálicos, incendio, riesgos físicos, biológicos, ergonómicos u organizacionales.	ISO 27548:2024; ISO/ASTM 52933:2024; ISO/ASTM 52931:2023; ISO/ASTM 52938-1:2025; ISO/TS 12901-2:2026	Art. 2, Art. 3, Art. 4, Art. 7, Art. 8, Art. 10, Art. 11, Art. 12, Art. 13, Art. 14, Art. 15, Art. 16, Art. 17, Art. 18, Art. 19, Art. 20, Art. 22, Art. 23, Art. 24, Art. 25, Art. 27, Art. 29, Art. 30, Art. 31, Art. 32, Art. 34, Art. 35, Art. 36, Art. 37, Art. 38, Art. 42, Art. 43, Art. 45, Art. 48, Art. 49	35	71,4%

Nota: Elaboración propia a partir de la matriz de extracción de datos de los 49 estudios incluidos en la revisión sistemática.

(EPP), lo cual contradice la jerarquía de controles de la norma ISO 45001. Aunque la ventilación general y la extracción localizada son citadas con frecuencia, su implementación suele ser deficiente o carecer de mantenimiento sistemático. Como

conclusión, al sintetizar estos resultados es que la gestión del riesgo debe migrar hacia el principio de “Seguridad desde el Diseño” (Safe-by-Design). El control exitoso no reside en que el trabajador aprenda a convivir con el peligro usando una

TABLA 6. ARTÍCULOS SELECCIONADOS.

# Artículo	Título
1	Evaluation of nanoparticle exposure during Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) processes
2	Workplace Exposure to Dust Emissions in Additive Manufacturing with an FFF Method
3	Assessment of environmental and health impacts during 3D printing of candidate polymeric materials for space additive manufacturing
4	Is the workforce ready? A look at operational health and safety in additive manufacturing
5	Dermal exposure and surface contamination associated with the use of a cobalt-chrome alloy during additive manufacturing
6	Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Material Extrusion Printers Using Acrylonitrile–Butadiene–Styrene and Polylactic Acid Filaments in Printing Environments and Their Toxicological Concerns
7	A Critical Systematic Scoping Review on the Applications of Additive Manufacturing (AM) in the Marine Industry
8	Comprehensive Threat Analysis in Additive Manufacturing Supply Chain: A Hybrid Qualitative and Quantitative Risk Assessment Framework
9	Addressing safety and sustainability issues in the development of nano-enabled MULTI-FUNCTIONal materials for metal additive manufacturing
10	A Hierarchical Axiomatic Evaluation of Additive Manufacturing Equipment and the 3D Printing Process Based on Sustainability and Human Factors
11	Safety practices and occupational hazards of the additive manufacturing of high entropy alloys
12	Everything falls apart: How solids degrade and release nanomaterials, composite fragments, and microplastics
13	Analysis of gaseous emission and particle number size distributions in metal casting processes with binder jetting moulds
14	Using Rapid Prototyping to Develop a Cell-Based Platform with Electrical Impedance Sensor Membranes for In Vitro RPMI2650 Nasal Nanotoxicology Monitoring
15	Metal powder as feedstock for laser-based additive manufacturing: From production to powder modification
16	Risk Assessment and Toxicity Effects of Materials Used During Additive Manufacturing with FDM Technology; Ocena Zagrożeń I Działanie Toksyczne Materiałów Stosowanych Podczas Drukowania Przestrzennego W Technologii FDM
17	Assessment of emissions and exposure in 3D printing workplaces in Taiwan
18	The Role of Virtual Reality Simulation in Manufacturing in Industry 4.0
19	3D Printing-Enabled Design and Manufacturing Strategies for Batteries: A Review
20	Characterization of Volatile and Particulate Emissions from Desktop 3D Printers
21	Explosion Risk of Metal Powder Used in Additive Manufacturing
22	Leaching of Nano-Additives as a Method for Life-Cycle Suitability: A Study on 3D-Printed Nanocomposites for Wearables Applications
23	Integrating Exposure Assessment and Process Hazard Analysis: The Nano-Enabled 3D Printing Filament Extrusion Case
24	Workplace Exposure Measurements of Emission from Industrial 3D Printing

TABLA 6. ARTÍCULOS SELECCIONADOS.

# Artículo	Título
25	Emissions of Volatile Compounds and Solids during Additive Manufacturing by the FFF Method
26	Characterizing Nanoparticle Release Patterns of Laser Powder Bed Fusion in Metal Additive Manufacturing: First Step Towards Mitigation Measures
27	Chemicals released from 3D printers and the prevention of workers' health: a literature review
28	Occupational Exposure to Incidental Nanomaterials in Metal Additive Manufacturing: An Innovative Approach for Risk Management
29	Summary and derived Risk Assessment of 3D printing emission studies
30	A Human Factors Approach to Improve Layout Design for A Virtual Reality-based Training Platform
31	Occupational exposure and health surveys at metal additive manufacturing facilities
32	The Risk assessment of 3D printing FDM technology
33	Assessment of nanoparticle emission in additive manufacturing: Comparing wire and powder laser metal deposition processes
34	Variability in the inorganic composition of colored acrylonitrile–butadiene–styrene and polylactic acid filaments used in 3D printing
35	Particulate suspension: a review of studies characterizing particulates and volatile organic compounds emissions during additive manufacturing processes
36	Particle emissions and respiratory exposure to hazardous chemical substances associated with binder jetting additive manufacturing utilizing poly methyl methacrylate
37	A Clinical Risk Assessment of a 3D-Printed Patient-Specific Scaffold by Failure Modes and Effects Analysis
38	Exposure to chemical substances and particles emitted during additive manufacturing
39	A microscopy study of nanoparticles emitted during laser additive manufacturing with stainless steel powder
40	Fused Filament Fabrication 3D Printing: Quantification of Exposure to Airborne Particles
41	Toxicity evaluation of particles formed during 3D-printing: Cytotoxic, genotoxic, and inflammatory response in lung and macrophage models
42	Organic compound and particle emissions of additive manufacturing with photopolymer resins and chemical outgassing of manufactured resin products
43	Towards sustainable additive manufacturing: The need for awareness of particle and vapor releases during polymer recycling, making filament, and fused filament fabrication 3-D printing
44	Occupational exposure to ultrafine particles in metal additive manufacturing: A qualitative and quantitative risk assessment
45	Metal additive manufacturing and possible clinical markers for the monitoring of exposure-related health effects
46	Measurement of Nanoparticles in 3d Printing Using FFF/ FDM Technology
47	Nanoparticle Exposure and Workplace Measurements During Processes Related to 3D Printing of a Metal Object
48	Emissions associated with operations of four different additive manufacturing or 3D printing technologies
49	Powder bed fusion/sintering machines: Safety at workplaces

maskarilla, sino en la adopción de tecnologías con cerramiento absoluto, filtración certificada (HEPA/Carbono) y protocolos de limpieza húmeda o asistida por vacío que eliminen el riesgo en la fuente antes de que este alcance la zona de respiración del operario.

Discusión

Los hallazgos de esta revisión confirman que los riesgos emergentes en la Manufactura Aditiva (MA) no pueden ser evaluados de forma estática ni centrados exclusivamente en el equipo de impresión. La exposición ocupacional se manifiesta como un sistema dinámico donde la tecnología actúa simplemente como el medio, pero es la interacción química y física entre el material y la energía aplicada la que define la peligrosidad real del entorno⁽²⁾. Esta distinción es vital, pues explica por qué un mismo modelo de impresora presenta perfiles de emisión radicalmente distintos al transitar de un polímero termoplástico a un filamento cargado con aditivos metálicos o de carbono^(8,16).

El predominio del proceso FFF/FDM en el 55,1% de la evidencia analizada revela una preocupante normalización de la tecnología en espacios no industriales. Existe una falsa percepción de seguridad alimentada por el diseño compacto y la facilidad de operación de estos equipos, lo que a menudo deriva en una gestión negligente de la ventilación (5,26). Sin embargo, el calentamiento de filamentos como el ABS y el PLA no es un proceso inerte; actúa como un reactor térmico que libera un “cóctel” de partículas ultrafinas (UFP) y compuestos orgánicos volátiles (COV)^(5,27). Autores como Romanowski et al.⁽⁸⁾ subrayan que, aunque las emisiones del PLA suelen ser menores, la presencia de colorantes y aditivos puede disparar la tasa de liberación de partículas a niveles comparables con polímeros más críticos, desafiando la jerarquía de controles tradicionales. En contraste, las tecnologías metálicas como PBF y DED desplazan el riesgo hacia la manipulación física del material. En estos escenarios, el peligro

no se restringe a la fase de fusión por láser; la evidencia identifica como hitos críticos las tareas de tamizado, carga de polvo y limpieza de cámaras^(28,29). Estudios como el de Perneti et al. advierten que incluso en sistemas de arco de alambre (WAAM) considerados “cerrados”, la liberación de nanopartículas incidentales durante la activación del arco eléctrico puede exceder los valores de referencia si no existe una contención desde el diseño. Aquí, la contaminación de superficies y la transferencia dérmica de metales como el níquel, cromo o cobalto configuran un riesgo silencioso que los monitoreos de aire convencionales suelen omitir^(19,22).

El resultado más significativo de este estudio es que el 71,4% de los artículos reportan escenarios de peligro mixto⁽³⁰⁾. Esto ratifica que la gestión preventiva ha fracasado al intentar aislar contaminantes. En la práctica, un operario de manufactura aditiva se enfrenta simultáneamente a la inhalación de vapores, el contacto dérmico con acrilatos o polvos reactivos y riesgos físicos como el ruido o el estrés térmico⁽²⁷⁾. Por lo tanto, la prevención debe migrar hacia marcos integrados como el Control Banding o herramientas específicas para nanopartículas incidentales, como el CB Nanotool, que permiten tomar decisiones en contextos de incertidumbre toxicológica⁽²⁸⁾.

Finalmente, aunque la evaluación bajo la escala STROBE arroja un cumplimiento del 90,3%, es imperativo señalar una debilidad sistémica en la literatura: la falta de declaración explícita de sesgos e incertidumbres en las mediciones de campo. La variabilidad en los límites de detección y las condiciones de ventilación no siempre reportadas dificultan la comparabilidad total de los estudios. Además, persiste un vacío crítico en investigaciones longitudinales sobre efectos crónicos en la salud y una ausencia notable de estudios en el contexto latinoamericano. Para países como Colombia, es urgente desarrollar guías técnicas que no solo repliquen estándares internacionales, sino que se adapten a la informalidad y diversidad de materiales reciclados

que empiezan a integrarse en las cadenas locales de manufactura aditiva

La presente revisión sistemática permite concluir que la Manufactura Aditiva (MA) ha dejado de ser un entorno de riesgo controlado para convertirse en un ecosistema de exposición multicausal. La seguridad del trabajador no depende de la tecnología de forma aislada, sino de la interacción sinérgica entre el material, la energía aplicada y los protocolos de limpieza post-proceso^(31,32). La evidencia analizada obliga a abandonar la visión tradicional de gestionar contaminantes únicos para migrar hacia marcos de gestión de peligros mixtos, un escenario reportado por el 71,4% de los estudios analizados y que representa el desafío preventivo más complejo de la industria actual⁽¹⁹⁾. En el ámbito de las tecnologías de polímeros (FFF/FDM), es imperativo desmentir la supuesta inocuidad de los equipos de escritorio. El calentamiento de filamentos actúa como un proceso de degradación térmica que libera partículas ultrafinas (UFP) y compuestos químicos volátiles (COV), cuya peligrosidad se ve exacerbada por variables operativas como la temperatura del extrusor y la ausencia de cerramientos con filtración certificada⁽³¹⁾. Por su parte, en las tecnologías metálicas (PBF/DED), el riesgo se desplaza hacia las fases manuales; la manipulación de polvos y el mantenimiento de las cámaras configuran hitos críticos de exposición dérmica y suspensión de nanopartículas, lo que exige una higiene de superficies mucho más rigurosa que en la manufactura convencional.

A pesar de que la calidad del reporte científico en este campo es alta, con un cumplimiento del 90,3% bajo la escala STROBE, persiste una debilidad crítica en la declaración de metadatos de ventilación en los estudios de campo⁽¹⁹⁾. Esta falta de estandarización dificulta la creación de límites de exposición profesional (OEL) específicos para la MA y mantiene una brecha persistente entre la innovación productiva y la protección efectiva de la salud^(2,19).

Finalmente, para el contexto de Colombia y Latinoamérica, esta revisión subraya una

necesidad urgente: el desarrollo de guías técnicas que trasciendan el uso reactivo de Elementos de Protección Personal (EPP). La transición hacia una manufactura aditiva segura requiere adoptar el principio de “Seguridad desde el Diseño” (Safe-by-Design), integrando ventilación localizada, monitoreo ambiental continuo y una formación técnica que capacite al trabajador sobre la naturaleza química real de los materiales que transforma cada día

Bibliografía

1. International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/74641.html>. 2023. ISO/ASTM 52931:2023.
2. Perneti R, Paulin N, Benni AA, Paradiso F, Previtali B, Oddone E. Evaluation of nanoparticle exposure during Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) processes. *CIRP J Manuf Sci Technol*. 2026 Feb 1;64:149–59. doi:10.1016/j.cirpj.2025.12.006
3. International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/contents/data/standard/08/37/83712.html>. 2024. ISO 27548:2024.
4. International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/80712.html>. 2025. ISO/ASTM 52938-1:2025.
5. Dostatni E, Osiński F, Karwasz A. Emissions of Volatile Compounds and Solids during Additive Manufacturing by the FFF Method. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2023 Jun 1;13(11). doi:10.3390/app13116371
6. Kangas A, Kukko K, Kanerva T, Säämänen A, Akmal JS, Partanen J, et al. Workplace Exposure Measurements of Emission from Industrial 3D Printing. *Ann Work Expo Health*. 2023 Jun 1;67(5):596–608. doi:10.1093/annweh/wxad006
7. Väisänen A, Alonen L, Ylönen S, Hyttinen M. Organic compound and particle emissions of additive manufacturing with photopolymer resins and chemical outgassing of manufactured resin products. *Journal of Toxicology and Environmental Health - Part A: Current Issues*. 2022;85(5):198–216. doi:10.1080/15287394.2021.1998814 PubMed PMID: 34763622.

8. Chuang YS, Berekute AK, Hsu HY, Wei HS, Gong WC, Hsu YY, et al. Assessment of emissions and exposure in 3D printing workplaces in Taiwan. *J Occup Environ Hyg.* 2024;21(4):270–86. doi:10.1080/15459624.2024.2313655 PubMed PMID: 38451632.
9. Tranfield D, Denyer D, Smart P. Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. *British Journal of Management.* 2003 Sep 16;14(3):207–22. doi:10.1111/1467-8551.00375
10. Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ.* 2021 Mar 29;n71. doi:10.1136/bmj.n71
11. PRISMA Statement. <https://www.prisma-statement.org/prisma-2020-flow-diagram>. 2026. PRISMA 2020 Flow Diagram.
12. International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/75759.html>. 2024. ISO/ASTM 52933:2024.
13. International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/82791.html>. 2026. ISO/TS 12901-2.
14. STROBE Statement. <https://www.strobe-statement.org/checklists/>. 2026. STROBE Checklist: cross-sectional studies.
15. Elm E von, Altman DG, Egger M, Pocock SJ, Gøtzsche PC, Vandenbroucke JP. Strengthening the reporting of observational studies in epidemiology (STROBE) statement: guidelines for reporting observational studies. *BMJ.* 2007 Oct 20;335(7624):806–8. doi:10.1136/bmj.39335.541782.AD
16. Dobrzyńska E, Kondej D, Kowalska J, Szewczyńska M. Exposure to chemical substances and particles emitted during additive manufacturing. *Environmental Science and Pollution Research.* 2022 Jun 1;29(26):40273–8. doi:10.1007/s11356-022-20347-2 PubMed PMID: 35484457.
17. Vallabani NVS, Alijagic A, Persson A, Odnevall I, Särndahl E, Karlsson HL. Toxicity evaluation of particles formed during 3D-printing: Cytotoxic, genotoxic, and inflammatory response in lung and macrophage models. *Toxicology.* 2022 Feb 15;467. doi:10.1016/j.tox.2022.153100 PubMed PMID: 35032623.
18. Kangas A, Kukko K, Kanerva T, Säämänen A, Akmal JS, Partanen J, et al. Workplace Exposure Measurements of Emission from Industrial 3D Printing. *Ann Work Expo Health.* 2023 Jun 1;67(5):596–608. doi:10.1093/annweh/wxad006
19. Sousa M, Arezes P, Silva F. Occupational exposure to ultrafine particles in metal additive manufacturing: A qualitative and quantitative risk assessment. *Int J Environ Res Public Health.* 2021 Sep 1;18(18). doi:10.3390/ijerph18189788 PubMed PMID: 34574711.
20. Ljunggren SA, Ward LJ, Graff P, Persson A, Lind ML, Karlsson H. Metal additive manufacturing and possible clinical markers for the monitoring of exposure-related health effects. *PLoS One.* 2021 Mar 1;16(3 March). doi:10.1371/journal.pone.0248601 PubMed PMID: 33735215.
21. Jensen AC O., Harboe H, Brostrøm A, Jensen KA, Fonseca AS. Nanoparticle Exposure and Workplace Measurements During Processes Related to 3D Printing of a Metal Object. *Front Public Health.* 2020 Nov 25;8. doi:10.3389/fpubh.2020.608718 PubMed PMID: 33324605.
22. Stefaniak AB, Bowers LN, Cottrell G, Erdem E, Knepp AK, Martin SB, et al. Towards sustainable additive manufacturing: The need for awareness of particle and vapor releases during polymer recycling, making filament, and fused filament fabrication 3-D printing. *Resour Conserv Recycl.* 2022 Jan 1;176. doi:10.1016/j.resconrec.2021.105911
23. Noskov A, El-Khoury M, Drobyshev S, Kuchaev E, Yanbaev F, Zhigalina O, et al. A microscopy study of nanoparticles emitted during laser additive manufacturing with stainless steel powder. *Materials Letters: X.* 2022 Jun 1;14. doi:10.1016/j.mlblux.2022.100139
24. Saliakas S, Karayannis P, Kokkinopoulos I, Damilos S, Gkartzou E, Zouboulis P, et al. Fused Filament Fabrication 3D Printing: Quantification of Exposure to Airborne Particles. *Journal of*

Composites Science. 2022 May 1;6(5). doi:10.3390/jcs6050119

25. Sun S, Xing C, Ding J, Cheng Y, Liu K, Pang L. Explosion Risk of Metal Powder Used in Additive Manufacturing. *Processes*. 2023 Oct 1;11(10). doi:10.3390/pr11102943

26. Sousa M, Arezes P, Silva F. Occupational Exposure to Incidental Nanomaterials in Metal Additive Manufacturing: An Innovative Approach for Risk Management. *Int J Environ Res Public Health*. 2023 Feb 1;20(3). doi:10.3390/ijerph20032519 PubMed PMID: 36767885.

27. Hamrol A, Osiński F. Workplace Exposure to Dust Emissions in Additive Manufacturing with an FFF Method. *Processes*. 2025 Nov 1;13(11). doi:10.3390/pr13113470

28. Romanowski H, Bierkandt FS, Luch A, Laux P. Summary and derived Risk Assessment of 3D printing emission studies. *Atmospheric Environment*. Elsevier Ltd; 2023. doi:10.1016/j.atmosenv.2022.119501

29. Assenhöj M, Almstrand AC, Kokelj S, Ljunggren SA, Olin AC, Karlsson H. Occupational exposure and health surveys at metal additive manufacturing facilities. *Front Public Health*. 2023;11. doi:10.3389/fpubh.2023.1292420 PubMed PMID: 38054074.

30. Wohlleben W, Bossa N, Mitrano DM, Scott K. Everything falls apart: How solids degrade and release nanomaterials, composite fragments, and microplastics. *NanoImpact*. 2024 Apr 1;34. doi:10.1016/j.impact.2024.100510 PubMed PMID: 38759729.

31. Mendoza-Muñoz I, Montoya-Reyes MI, Maldonado-Macías AA, Jacobo-Galicia G, Vargas-Bernal OY. A Hierarchical Axiomatic Evaluation of Additive Manufacturing Equipment and the 3D Printing Process Based on Sustainability and Human Factors. *Processes*. 2024 Jun 1;12(6). doi:10.3390/pr12061083

32. Dobrzyńska E, Chojnacka-Puchta L, Sawicka D, Sobiech P, Jankowski T, Okołowicz A, et al. Risk Assessment and Toxicity Effects of Materials Used During Additive Manufacturing With FDM Technology. *Medycyna Pracy. Nofer Institute of Occupational Medicine*; 2024. p. 159–71. doi:10.13075/mp.5893.01486 PubMed PMID: 38523548.