

Artículo de revisión

Factores de riesgos laborales asociados al proceso de biorremediación en plantas eléctricas

Occupational risk factors associated with the bioremediation process in power plants

Jainer Enrique Molina-Romero ¹, Luciana Hernández-Maldonado ¹, Mónica De Jesús Gómez-Barbosa ¹,
Aracely García-Cuan ¹ Helmer David Aguallimpia-Romero ²

Received: 15 septiembre 2023

Accepted: 23 noviembre 2023

Resumen

Introducción: Este estudio aborda los riesgos laborales vinculados a la biorremediación en plantas eléctricas, donde microorganismos transforman contaminantes. Destaca su relevancia en la industria eléctrica, señalando ventajas ambientales y riesgos para los trabajadores, incluyendo aspectos químicos, biológicos, físicos, ergonómicos y psicosociales. Se discuten los efectos en la salud respiratoria y general de los trabajadores debido a la exposición a químicos y microorganismos, así como el riesgo de enfermedades infecciosas por manipulación de materiales contaminados.

Métodos: el estudio se basa en una revisión sistemática de literatura científica publicada entre 2017 y 2023 en bases de datos como Dialnet, Pubmed, Scielo, Clinical Key y Bvs. Los criterios de búsqueda se centran en descriptores como riesgo químico, riesgo biológico, riesgo físico, biorremediación de suelo, enfermedad laboral y riesgo psicosocial.

Resultados: la revisión teórica con 21 artículos revela que España lidera en producción intelectual (24%), seguida por Estados Unidos y Colombia (19% cada uno), destacando 2019 (24%) y 2023 (19%) como años principales. Los artículos subrayan la importancia de la biorremediación para mitigar riesgos y contaminación, pero también resaltan riesgos laborales. La exposición constante a microorganismos y químicos afecta la salud de los trabajadores, requiriendo medidas de monitoreo y prevención ante posibles enfermedades. La colaboración interdisciplinaria entre expertos en salud laboral, medio ambiente y biotecnología es crucial para abordar eficazmente los riesgos laborales.

Conclusiones: la biorremediación ofrece beneficios ambientales, pero se deben implementar normas y medidas preventivas para garantizar seguridad y salud de los empleados en este contexto industrial en crecimiento.

Palabras clave: Riesgos laborales, plantas eléctricas, biorremediación, salud laboral, ambiente sano

Abstract

Introduction: This study addresses occupational risks associated with phytoremediation in power plants, where microorganisms transform pollutants. It highlights its relevance in the electrical industry, noting environmental benefits and risks for workers, encompassing chemical, biological, physical, ergonomic, and psychosocial aspects. The impact on respiratory and overall health of workers due to exposure to chemicals and microorganisms is discussed, along with the risk of infectious diseases from handling contaminated materials.

Methods: The study is based on a systematic review of scientific literature published between 2017 and 2023, sourced from databases such as Dialnet, Pubmed, Scielo, Clinical Key, and Bvs. Search criteria focused on descriptors like chemical risk, biological risk, physical risk, soil phytoremediation, occupational disease, and psychosocial risk.

Results: The theoretical review comprising 21 articles reveals Spain leading in intellectual production (24%), followed by the United States and Colombia (19% each), with 2019 (24%) and 2023 (19%) standing out. Articles emphasize the importance of phytoremediation in mitigating risks and pollution but also underscore occupational hazards. Constant exposure to microorganisms and chemicals affects worker health, necessitating monitoring and preventive measures against potential illnesses. Interdisciplinary collaboration among occupational health, environmental, and biotechnology experts is crucial for effectively addressing occupational risks.

Conclusions: Phytoremediation offers environmental benefits, but stringent standards and preventive measures must be implemented to ensure the safety and health of employees in this growing industrial context.

Key words: SOccupational Hazards, Power Plants, Bioremediation, Occupational Health, Healthy Environment

¹ Universidad Libre, Maestría en Seguridad y Salud en el Trabajo, Barranquilla, Colombia

² Corporación Universitaria Rafael Núñez, Barranquilla, Colombia

Autor de correspondencia: Luciana Hernández-Maldonado. Correo: : lucianai.hernandezm@unilibre.edu.co

El presente artículo es resultado del Proyecto de Investigación: “Análisis de riesgos laborales como estrategia de competitividad del modelo de negocios del proyecto spin off tecnología de biorremediación de suelos y eliminación de residuos a través de setas comestibles” financiado por la Universidad Libre Seccional Barranquilla.

Introducción

La biorremediación es un “proceso que utiliza organismos vivos, específicamente plantas, microorganismo o enzima para eliminar, reducir o degradar contaminantes y transformarlos en sustancias menos tóxicas o no tóxicas”.¹

La Organización Internacional del Trabajo ha establecido que dentro del proceso se utiliza organismos vivos como bacterias, hongos y plantas para degradar o transformar contaminantes que no impacten el medio ambiente.² En el contexto de las plantas eléctricas, la biorremediación puede ser utilizada para tratar los residuos o contaminantes generados por estas instalaciones. El proceso es utilizado para mejorar suelos y aguas contaminadas por residuos tóxicos producidos por la actividad de las plantas de electricidad.

De igual forma, el proceso de biorremediación es una opción efectiva y respetuosa con el medio ambiente que permite disminuir la contaminación causada por las plantas eléctricas; entre las principales ventajas se encuentra que es un método con pocas alteraciones a la naturaleza ya que existe menos daños irreversibles a los ecosistemas. Dentro de la ruta de biorremediación en las plantas eléctricas se encuentran varias etapas: la primera consiste en la evaluación de la contaminación: aquí es necesario identificar y evaluar los contaminantes presentes en el suelo y el agua cercanos a la planta eléctrica, esta evaluación determinará qué tipo de microorganismos serán necesarios para la biorremediación.

Como explica el Ministerio del Trabajo de Colombia,³ en la segunda etapa se realiza el proceso de selección de microorganismos, es decir que se ha identificado el contaminante, se seleccionan los microorganismos adecuados para el proceso de biorremediación; estos pueden ser bacterias que mediante el proceso de óxido reducción se logra la oxidación de agentes contaminantes, también se utilizan hongos o algas. Este proceso se lleva a cabo con distintos contaminantes tales como: hidrocarburos aromáticos policíclicos, petróleo, pesticidas, clorofenoles, metales pesados, colorantes, sulfatos, y otros.³

Conforme a lo investigado por González y Mendoza⁴ las sustancias químicas en cualquiera de sus formas: líquido, sólido, gaseoso o en nano partículas, afectan la salud de quienes son responsables del proceso de biorremediación en las plantas eléctricas, provocando daños en la piel, ojos, vías respiratorias, manos y mucosas, mareos, picor en los ojos. Específicamente la manipulación de hidrocarburos por periodos prolongados puede generar afectaciones serias en el sistema nervioso, respiratorio, gastrointestinal y piel.

Por otro lado, explica Robbins,⁵ que, todo trabajador involucrado en el proceso de biorremediación se expone a compuestos químicos

de hidrocarburos totales de petróleo, especialmente el benceno, tolueno y xileno sustancias que afectan el sistema nervioso generando fatiga, dolor de cabeza, náusea y adormecimiento, daño permanente del sistema nervioso central. El n-hexano es una sustancia química utilizada en el proceso de biorremediación que produce neuropatía periférica, relacionada con la pérdida de la sensibilidad en miembros inferiores hasta parálisis;⁵ la ingestión de derivados del petróleo causa en el trabajador irritación de la garganta y estómago, depresión del sistema nervioso, dificultad para respirar y neumonía debido al paso de líquido hacia los pulmones, otros componentes químicos afectan la sangre, el sistema inmunitario, el hígado, el bazo, los riñones, los pulmones, irritar la piel, los ojos, en caso de embarazo se puede ver afectado el feto.⁵

Una publicación de la Biblioteca Nacional de Medicina de los Estados Unidos⁶ explica que la tercera etapa consiste en la preparación del suelo y agua en condiciones adecuadas para que los microorganismos puedan llevar a cabo del proceso con el control de nutrientes, luz, humedad, temperatura entre los 15 a 40 °C y ajustes de pH entre 6-8. Así mismo la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades⁷ considera que para finalizar, el operario del proceso aplica microorganismos al suelo y/o agua contaminados que son los responsables de degradar los contaminantes, transformándolos en sustancias menos tóxicas o no tóxicas, permitiendo la utilización sin causar deterioro de la salud de la comunidad. Contrario a las estadísticas divulgadas por Murcia & Arenas,⁸ los trabajadores se exponen a riesgos de tipo biológico por presencia y manipulación de agentes biológicos que pueden causar lesiones o enfermedades laborales como: la actinomicosis enfermedad progresiva que puede presentarse especialmente en pacientes inmunocomprometidos, generando lesiones pustulosas cérvico-faciales empeorando progresivamente en las formas torácica, abdominal y generalizada, en especial si está comprometido el sistema nervioso central.

Según datos del Ministerio del Trabajo de Colombia,⁹ el hongo *Aspergillus fumigatus*, es el agente responsable del 85 % de casos de infección humana, como se referencia en la tabla de enfermedades laborales reconocidas en el Decreto 1477, la inhalación de sus esporas, las cuales germinan y desarrollan hifas, ingresan en los vasos sanguíneos causando necrosis hemorrágica o infarto al invadir los tejidos, sus manifestaciones clínicas son similares al asma, la neumonía, sinusitis o como una enfermedad rápidamente progresiva determinada por el estado inmunológico del trabajador. Los trabajadores del proceso de biorremediación de las plantas eléctricas, no solo se exponen a los riesgos laborales de tipo químico y biológico, sino también a los físicos, biomecánicos y psicosociales. Dentro de los riesgos físicos los operarios tienen una exposición a vibraciones por causa de la maquinaria, radiaciones no ionizantes, ruido, entre otros, produciendo en el trabajador alteración de funciones cognitivas, conllevando a la atención lábil, somnolencia, alteraciones en el rendimiento laboral, hipoacusia/sordera, taquicardia, hipertensión arterial, trastornos del sueño y cambios en la conducta. De igual forma las radiaciones pueden producir quemaduras superficiales, enrojecimiento de piel, lesiones en ojos, dermatitis en manos, cataratas, cáncer, por otra parte, la humedad y la temperatura no apropiada por tiempo prolongado puede generar calambres, agotamiento, deshidratación, golpe de calor y quemaduras.

Tabla 1. Algoritmos de búsqueda

“riesgos laborales” AND “proceso de biorremediación” AND “plantas eléctricas”
“Biodegradación de hidrocarburos” OR “Biodegradación de suelos”
"biological risk from contaminated soil" AND "infectious diseases from contaminated soil"
“Contaminación ambiental” AND “cáncer”
"enfermedades respiratorias" AND "contaminación ambiental"
"bacterium" AND "bioremediation"
“hongos” AND “biorremediación”

La candida, es un agente biológico que se registra como causante de enfermedad laboral, especialmente cuando las condiciones ambientales presentan alto nivel de humedad, sumado a una condición de base del trabajador donde se predispone a la infección y lesiones mucocutáneas de color blanco en mucosas.

Ahora bien el proceso de biorremediación es una actividad de índole laboral inmersa en la industria donde cada uno de los operarios se encuentran expuestos a riesgos laborales de tipo biológico, químico, físico, ergonómicos y psicosociales, por tal razón en términos de seguridad y salud en el trabajo los trabajadores deben ser capacitados en el tema, porque sus funciones son descritas por la manipulación de patógenos, exposición a radiaciones no ionizantes, golpes o caídas por el uso de maquinarias pesadas, temperaturas extremas, frío o calor y utilización de agentes químicos para descomponer los contaminantes.

De acuerdo con el reporte de FASECOLDA ¹⁰ las empresas de los distintos sectores de la economía de Colombia, incluyendo las empresas de biorremediación, evidencian desde el año 2019 hasta el 2022 el reporte de 2.069.404 accidentes de trabajo (AT), 132.181 enfermedades laborales (EL), 1.795 muertes por AT y 239 muertes por enfermedades laborales. Por tal razón los empleadores tienen la responsabilidad de establecer estrategias que permitan identificar, controlar y evaluar los riesgos laborales sean físicos, químicos, biológicos, psicosociales, biomecánicos, a los cuales se exponen los trabajadores, estableciendo acciones que promuevan el mantenimiento de la salud y la prevención oportuna de un accidente de trabajo y/o enfermedad laboral.

Por último, de acuerdo con Bobadilla y Charria et al. ¹¹, existe una exposición a los riesgos biomecánicos por causa de movimientos repetitivos, manipulación de carga y postura forzada durante la jornada laboral, causando en los trabajadores lumbalgias, lesiones de muñeca, codo, contracturas involuntarias, parestesias, disminución de la prensión. Los factores asociados al riesgo psicosocial por las condiciones intralaborales y extralaborales no permiten que el trabajador desarrolle sus funciones de manera segura debido al ambiente de trabajo poco agradable e inadecuada organización empresarial.

Teniendo en cuenta la descripción del problema de los trabajadores de las plantas eléctricas donde se realiza el proceso de biorremediación, se planteó el siguiente interrogante ¿Cuáles

son los factores de riesgos laborales asociados al proceso de biorremediación de suelos contaminados en plantas eléctricas? A través de esta investigación se identificaron los factores de riesgos laborales asociados al proceso de biorremediación de suelos contaminados en plantas eléctricas. Con el fin de dar a conocer a la comunidad científica, sector empresarial y trabajadores las bases teóricas de la exposición laboral que tienen los operarios en desarrollo de los procesos de biorremediación. De esta manera, los empleadores pueden implementar estrategias que disminuyan la exposición a los diferentes peligros asociados con alteraciones en la salud física y mental; por consiguiente, se dispone de fundamentos científicos suficientes para realizar propuestas de seguridad y salud en el trabajo en plantas de biorremediación que mejoren el ambiente laboral, el autocuidado y mantenimiento de la salud del trabajador, beneficiando así el área en la cual se encuentra.

Materiales y métodos

La presente investigación se realizó bajo los parámetros de una revisión sistemática de publicaciones que cumplieran con los criterios establecidos, libros, artículos científicos y tesis doctorales, encontrados en las siguientes bases de datos: Dialnet, Pubmed, Scielo, Clinical Key y Bvs.

Como criterios de búsqueda, se incluyeron libros, artículos científicos y tesis doctorales publicados entre los años 2017 a 2023. Además, que en el título, resumen u objetivo se encontraran algunos de los siguientes descriptores: Riesgo químico, riesgo biológico, riesgo físico, biorremediación de suelo, enfermedad laboral, riesgo psicosocial. Posteriormente fueron organizados en algoritmos con el uso de los operadores booleanos como AND y OR.

En la Tabla 1 se presentan los algoritmos utilizados en la búsqueda sistemática

Se realizó la selección de los algoritmos de búsqueda que permitieran conocer el estado del arte acerca de la biorremediación y los riesgos de sufrir una enfermedad laboral desde los aspectos biológicos, físicos, químicos y psico-social. Luego de esto se realizó la búsqueda en las bases de datos seleccionadas determinando que en algunas no existe documentación referente a los algoritmos seleccionados en lengua hispana ni en inglés (Tabla 2).

Posteriormente se hizo la selección de los diferentes artículos encontrados que cumplieron con los criterios de inclusión: fecha de publicación, año 2017 hasta el 2023, y que su contenido aporte al objeto de esta revisión.

Los documentos identificados en las bases de datos Dialnet, Pubmed, Clinicalkey, Scielo y Bvs fueron 38.784, a los cuales se les verificó el cumplimiento de los criterios de inclusión y se eliminaron los artículos duplicados (Tabla 3).

En esta fase de elegibilidad, se seleccionaron 21 artículos, los cuales cumplieron con los criterios de inclusión y se relacionarán con los riesgos laborales asociados al proceso de biorremediación en plantas eléctricas (Tabla 4).

La matriz de análisis diseñada por los investigadores para extraer

Tabla 2. Fase I documentos identificados en bases de datos

No	Algoritmos	Dial-net	Pubmed	Clinicalkey	Scielo	Bvs
1	“riesgos laborales” AND “proceso de biorremediación” AND “plantas eléctricas”	0	0	82	0	0
2	“riesgos laborales” AND “plantas eléctricas”	0	0	0	0	44
3	“Biodegradación de hidrocarburos” OR “Biodegradación de suelos”	20	4	66	0	21.067
4	"enfermedades respiratorias" AND "hidrocarburos"	2	0	0	0	0
5	"respiratory diseases" AND "hydrocarbons"	0	122	0	0	0
6	"bacterium" AND "bioremediation"	0	1.372	30	17	5.879
7	“hongos” AND “biorremediación”	57	2	474	0	9.544
8	“Contaminación ambiental” AND “cáncer” AND "hidrocarburos"	2				
TOTAL		81	1.500	652	17	36.534

la información de los 21 artículos contenía en su estructura la identificación del país, año de publicación, tipo de revista y el aporte u orientaciones hacia el objeto de estudio.

De los 21 artículos, la mayor producción intelectual sobre los riesgos laborales asociados al proceso de biorremediación en plantas eléctricas se halló en España (24 %), seguido de Estados Unidos y Colombia (19 % cada uno), Reino Unido (9.5 %), Holanda, México, Canadá, Alemania, Suiza y Brasil (5 % c/u). El año con mayor publicación fue el 2019 (24%), seguido del 2023 con el 19% de artículos publicados en el área de interés de la investigación.

Sobre las orientaciones de los artículos hacia el objeto de estudio en la investigación, se evidenció que la biorremediación en plantas eléctricas es una técnica de suma importancia para reducir los riesgos y contaminación ambiental a través de la utilización de microorganismos del suelo. Este enfoque de remediación del suelo es prometedor para el sector industrial por su bajo costo y facilidad de aplicación sin requerir de una infraestructura con alta inversión, sin embargo, los artículos analizados evidencian que su implementación denota riesgos laborales para la salud de las personas que la utilizan, debido a la exposición permanente con los agentes biológicos (bacterias, hongos, algas y compuestos) aplicados en las zonas a remediar, por lo tanto, cada autor

exhorta en sus resultados la imperiosa necesidad de cumplir con las medidas de bioseguridad que protejan al trabajador y eviten la presentación de enfermedades de origen laboral como enfermedades infecciosas, asma, alergias, cáncer, bronquitis crónica, enfermedad pulmonar obstructiva y enfermedad cardiovascular entre otras, que conllevan a fallas de los sistemas corporales, incapacidad y aún la muerte en los trabajadores.

Discusión

A continuación, dimensiones del análisis realizado sobre la biorremediación y los riesgos de sufrir enfermedad laboral.

Definición

La biorremediación, es una técnica que utiliza microorganismos del suelo para degradar los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) en compuestos menos tóxicos, se destaca como un enfoque prometedor para abordar la contaminación ambiental en entornos industriales como las plantas eléctricas. (12) La posibilidad de llevar a cabo la biorremediación in situ, sin la necesidad de costosas infraestructuras o enmiendas, resalta su potencial económico y práctico en estas aplicaciones. No obstante, al considerar los riesgos laborales asociados a esta técnica, es esencial abordar la posible exposición de los trabajadores a los compuestos resultantes y evaluar su impacto en la salud humana.

Tabla 3. Fase II documentos elegidos por cumplir con los criterios de inclusión

No	Algoritmos	Dialnet	Pubmed	Clinicalkey	Scielo	Bvs
1	“riesgos laborales” AND “proceso de biorremediación” AND “plantas eléctricas”	4	1	0	0	1
2	“riesgos laborales” AND “plantas eléctricas”	0	0	1	1	0
3	“Biodegradación de hidrocarburos” OR “Biodegradación de suelos”	2	1	0	2	1
4	"biological risk from contaminated soil" AND "infectious diseases from contaminated soil"	0	1	0	0	0
5	"enfermedades respiratorias" AND "hidrocarburos"	0	2	0	0	4
	"respiratory diseases" AND "hydrocarbons"	0	0	0	0	0
6	"bacterium" AND "bioremediation"	0	0	0	0	0
7	“hongos” AND “biorremediación”	0	0	0	0	0
8	“Contaminación ambiental” AND “cáncer” AND "hidrocarburos"	0	0	0	0	0
Total		6	5	1	3	6

Tabla 4. Fase III resultados de la revisión teórica

No	Autor Principal	Año	Título	Base de Datos	Revista	País
1	Estrella et al ¹	2023	La pandemia de COVID-19, una oportunidad excepcional para la integración de la salud laboral y la salud pública	Bvs	Anal Sistema Sanitario Navarra	España
2	Kumar et al ⁵	2018	Patología humana	ClinicalKey	Patología humana	España
3	Davie-Martin et al ¹²	2017	Implicaciones de la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos aromáticos policíclicos para la salud humana y el riesgo de cáncer	Pubmed	Environm Sci Technol	Estados Unidos
4	Ojuederie & Babalola ¹³	2017	Microbial and Plant-Assisted Bioremediation of Heavy Metal Polluted Environments: A Review	Pubmed	Internat J Environm Res Public Health	Suiza
5	Hopf, et al ¹⁴	2019	Early Effect Markers and Exposure Determinants of Metalworking Fluids Among Metal Industry Workers: Protocol for a Field Study	Pubmed	JMIR research protocols	Canada
6	Anedda et al ¹⁵	2019	Monitoring of Air Microbial Contaminations in Different Bioenergy Facilities Using Cultural and Biomolecular Methods	Bvs	Internat J Environm Res Public Health	Estados Unidos
7	Berumen-Rodríguez et al ¹⁶	2023	Assessment of inflammatory cytokines in exhaled breath condensate and exposure to mixtures of organic pollutants in brick workers	Pubmed	Environm Sci Pollution Res	Alemania
8	Geng et al ¹⁷	2022	Occurrence of polycyclic aromatic compounds and interdomain microbial communities in oilfield soils	Pubmed	Environm Res	Estados Unidos
9	Guzmán-González ¹⁸	2020	Riesgos y peligros laborales en termoelectricas: una revisión de la literatura de 2007 a 2017	Scielo	Rev UIS.	Colombia
10	Bortey-Sam et al ¹⁹	2017	Oxidative stress and respiratory symptoms due to human exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Kumasi, Ghana	Bvs	Environm Pollution	Reino Unido
11	Xu et al ²⁰	2018	Exposure, respiratory symptoms, lung function and inflammation response of road-paving asphalt workers	Bvs	Occupat Environm Med	Reino Unido
12	Tong et al ²¹	2019	Occupational exposure to respirable dust from the coal-fired power generation process: sources, concentration, and health risk assessment	Bvs	Arch Environm Occupat Health	Estados Unidos
13	Idavain et al ²²	2019	Respiratory symptoms, asthma and levels of fractional exhaled nitric oxide in schoolchildren in the industrial areas of Estonia	Bvs	Sci Total Environmen	Holanda
14	Mera-Mamián, et al ²³	2023	Exposición a material particulado y su relación con el cáncer de mama. Mecanismos fisiopatológicos	Dialnet	Med Laborat	Colombia
15	Vizuite-García et al ²⁴	2020	Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos a base de bacterias utilizadas como bioproductos	Scielo	Rev Lasallista Investig	Colombia
16	Leachi et al ²⁵	2020	Hidrocarburos aromáticos policíclicos y desarrollo de enfermedades respiratorias y cardiovasculares en trabajadores	Scielo	Rev Brasileira Enfermagem	Brasil
17	Escanciano ²⁶	2018	Sostenibilidad ambiental y prevención de riesgos laborales reflexiones sobre el sector de la construcción ecológica	Dialnet	Rev Ministerio Trabajo, Migraciones Seguridad Social	España
18	Cota-Ruiz et al ²⁷	2019	Biorremedación: actualidad de conceptos y aplicaciones	Dialnet	Biotecnia	México
19	Padilla et al ²⁸	2021	Condiciones de vida y salud de la población inmigrante de los asentamientos de Huelva	Dialnet	Rev Española Salud Públ	España
20	Rodríguez-Gonzales, et al ²⁹	2022	Biodiversidad bacteriana presente en suelos contaminados con hidrocarburos para realizar biorremediación	Dialnet	Rev Cien Ambientales	España
21	Florez ³⁰	2023	Bacterias y hongos utilizados en la biodegradación de hidrocarburos	Dialnet	Revista EIA	Colombia

Tendencias en seguridad laboral y ambiental

La seguridad del medio ambiente y de los trabajadores es una consideración crucial al implementar métodos biotecnológicos para la biorremediación en plantas eléctricas y otros entornos.¹³ El uso de microorganismos y plantas para la remediación de entornos contaminados con metales pesados tiene el potencial de reducir los riesgos ambientales, pero debe llevarse a cabo bajo estrictas normas de bioseguridad. La implementación de estas normas no solo garantiza la eficacia de la biorremediación, sino también la protección de los trabajadores involucrados en estos procesos.¹³

Hopf y Bourgkard et al.¹⁴, consideran que la relación entre la salud respiratoria de los trabajadores y la exposición a contaminantes en entornos laborales es una preocupación central en la discusión de riesgos laborales en la biorremediación en plantas eléctricas. El uso del óxido nítrico como biomarcador de inflamación bronquial resalta la importancia de monitorear la salud respiratoria de los trabajadores en estos entornos. La implementación de métodos no invasivos, como la medición del óxido nítrico exhalado, proporciona una herramienta valiosa para identificar posibles problemas de salud y prevenir condiciones como el asma. Dado que la biorremediación implica la manipulación de microorganismos y compuestos, la detección temprana de efectos adversos en la salud respiratoria de los trabajadores es esencial para abordar los riesgos laborales de manera efectiva.

Los trabajadores en plantas eléctricas que implementan la biorremediación pueden enfrentar exposiciones a bioaerosoles generados durante el proceso. Esta exposición se asocia con riesgos de enfermedades infecciosas, alergias, bronquitis crónica y enfermedad pulmonar obstructiva. La creciente atención a estos riesgos resalta la necesidad de adoptar medidas preventivas y de control.¹⁵ La contaminación generada por polvo, humos y sustancias tóxicas en la producción de energía eléctrica aumenta los riesgos para la salud respiratoria de los trabajadores. La alta exposición a contaminantes y el riesgo correspondiente de enfermedades respiratorias subrayan la importancia de implementar estrategias de prevención y control.¹⁶ El análisis de la ocurrencia de hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH) y su impacto en la salud humana en el contexto del sector energético, resalta la complejidad de evaluar riesgos laborales en la biorremediación. Hay un riesgo potencial de cáncer debido a la presencia de PAH en el suelo. Sin embargo, también se identificó el potencial de la comunidad microbiana para mitigar los contaminantes y reducir los riesgos para la salud. La correlación negativa entre la abundancia y diversidad microbiana con el riesgo para la salud destaca la importancia de comprender los factores biológicos y ambientales que pueden influir en los riesgos laborales y de salud en la biorremediación en plantas eléctricas.¹⁷

El aumento en la construcción de plantas térmicas de energía eléctrica puede tener implicaciones significativas en términos de riesgos y peligros laborales, ya que implica la incorporación de más trabajadores a un entorno donde los riesgos potenciales asociados con las operaciones de generación eléctrica están presentes.¹⁸

Al centrarse en el contexto de la biorremediación en plantas

eléctricas, es crucial considerar cómo esta actividad específica puede influir en los riesgos laborales existentes. La biorremediación implica la manipulación de microorganismos y compuestos químicos para eliminar contaminantes. Esta actividad puede añadir una capa adicional de riesgos en el entorno de trabajo, incluyendo la posible exposición a los contaminantes tratados, la interacción con microorganismos modificados genéticamente y los riesgos asociados con la manipulación de sustancias químicas.

Posibles afectaciones de salud laboral y pública

Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) son compuestos químicos que se encuentran en diversos contaminantes ambientales, incluidos los derivados del petróleo y la combustión incompleta de materiales orgánicos.¹⁹ La investigación realizada en Kumasi, Ghana, revela altas concentraciones de HAP y sus metabolitos en diferentes matrices, como PM10 (partículas en suspensión en el aire), factores de riesgo que influyen en el cáncer. Esto proporciona una base para entender la posible exposición a HAP en entornos con actividad industrial y contaminación ambiental similar a la que podría encontrarse en las plantas eléctricas. El aumento en la incidencia de cáncer y enfermedades respiratorias en Ghana refuerza la importancia de evaluar y mitigar los riesgos laborales asociados con la biorremediación en plantas eléctricas, dado que los trabajadores en estas plantas estarán expuestos a compuestos contaminantes similares.¹⁹

La exposición a polvo, a hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), a nitrosaminas y otros compuestos entre los trabajadores del sector industrial es una observación que puede relacionarse con la variabilidad de exposición en diferentes entornos laborales. Esto destaca la importancia de considerar que en el proceso de biorremediación en plantas eléctricas también pueden existir variaciones en la exposición a contaminantes y en los niveles de riesgo, lo cual debe ser tenido en cuenta al analizar los posibles efectos en la salud de los trabajadores.²⁰

Una investigación realizada en una central eléctrica de carbón, concluyó que las principales unidades productivas con emisión de polvo están divididas en distintos sistemas, como el sistema de manejo de carbón, el sistema de caldera, el sistema de desulfuración y el sistema de producción auxiliar.²¹ Esta información resalta la importancia de analizar y caracterizar las fuentes específicas de emisión de polvo en los distintos procesos involucrados en la biorremediación. Al igual que en la generación de energía a partir del carbón, los trabajadores en las plantas eléctricas que se dedican a la biorremediación pueden estar expuestos a diversas operaciones que generan polvo. Identificar estas operaciones es esencial para comprender la magnitud de la exposición y evaluar los riesgos laborales asociados.²¹ La mayoría de las investigaciones sobre contaminantes del aire y enfermedades respiratorias se ha centrado en gran medida en contaminantes convencionales, esto no significa que los trabajadores en plantas eléctricas involucrados en la biorremediación no estén expuestos a una gama de sustancias únicas. Dado que la biorremediación implica la manipulación de microorganismos y compuestos químicos, es fundamental considerar los efectos potenciales en la salud respiratoria.²² Por estas condiciones, La colaboración entre expertos en salud laboral y salud pública es fundamental para identificar y evaluar los riesgos en trabajadores, por ello, los principios de coordinación,

colaboración y vigilancia pueden ser aplicados para fortalecer la gestión de riesgos laborales en la biorremediación de plantas eléctricas.²³ Al tomar en cuenta estos mandatos, se puede mejorar la protección de los trabajadores en el proceso de biorremediación y reducir los riesgos asociados.

La implementación de la biorremediación en plantas eléctricas debe ser acompañada por una evaluación integral de los riesgos laborales asociados. Esto incluye la identificación de los microorganismos o biocompuestos utilizados, la caracterización de las posibles emisiones y la implementación de medidas de control para minimizar la exposición de los trabajadores.²⁴

Los hidrocarburos policíclicos aromáticos tienen un efecto perjudicial en el sistema cardiovascular y respiratorio, causando mutaciones e inflamaciones celulares. Estos efectos adversos pueden aumentar el riesgo de desarrollar enfermedades respiratorias y cardiovasculares en los trabajadores expuestos a estos compuestos. En el campo de la biorremediación en plantas eléctricas, donde la manipulación de sustancias contaminantes es común, es fundamental considerar los posibles impactos en la salud de los trabajadores, en aras de reducir los riesgos de salud laboral.²⁵

La biorremediación, como parte de la actividad productiva en las plantas eléctricas, no es una excepción en términos de riesgos. Aunque su objetivo es mitigar la contaminación ambiental, también puede exponer a los trabajadores a diversos riesgos debido a la manipulación de microorganismos y sustancias químicas. Es fundamental reconocer que, incluso en esfuerzos para la sostenibilidad ambiental, los riesgos laborales deben ser abordados y mitigados de manera efectiva.²⁶

La biorremediación es un enfoque esencial para abordar la contaminación generada por la actividad industrial, como la de las plantas eléctricas.²⁷ Sin embargo, este proceso también introduce nuevos riesgos laborales para los trabajadores involucrados. La discusión científica debe explorar cómo los beneficios ambientales de la biorremediación se equilibran con los riesgos para la salud y seguridad de los trabajadores. Los trabajadores en plantas eléctricas y en el ámbito de la biorremediación están expuestos a riesgos laborales, lo que aumenta su nivel de vulnerabilidad. Es necesario enfrentar esta problemática desde la óptica de la salud pública.²⁸

Como la biorremediación se basa en el uso de microorganismos para eliminar contaminantes, es importante considerar cómo la interacción entre estos microorganismos y los trabajadores podría influir en la salud laboral.²⁹ La exposición a estos microorganismos puede presentar riesgos adicionales para los trabajadores en el proceso de biorremediación. La utilización de cultivos microbianos en la biorremediación puede tener implicaciones en la exposición de los trabajadores a estos microorganismos. Los riesgos asociados con la manipulación de estos cultivos deben ser evaluados y abordados para garantizar la seguridad de los trabajadores involucrados en el proceso de biorremediación.³⁰

Por último, la exposición a contaminantes en las plantas eléctricas, especialmente aquellos relacionados con la biorremediación, puede aumentar la preocupación por la salud de los trabajadores.

La exposición a sustancias químicas y partículas en el proceso de biorremediación puede influir en la incidencia de enfermedades, como el cáncer.

Conclusiones

La biorremediación se presenta como una opción efectiva y respetuosa con el medio ambiente para tratar los residuos y contaminantes generados por las plantas eléctricas. Sus ventajas radican en su potencial para disminuir la contaminación ambiental y reducir los daños irreversibles a los ecosistemas, al tiempo que contribuye a la mejora de suelos y aguas contaminadas. Sin embargo, esta técnica conlleva a riesgos laborales significativos para los trabajadores involucrados en el proceso. La exposición a compuestos químicos, biológicos, físicos, ergonómicos y psicosociales puede afectar la salud y seguridad de los trabajadores, lo que resalta la importancia de abordar y mitigar estos riesgos.

La principal limitación del estudio radica en la falta de datos específicos sobre los riesgos laborales asociados a la biorremediación en plantas eléctricas en el contexto particular de cada instalación. Además, la variabilidad en los procesos de biorremediación, la diversidad de compuestos tratados y las diferencias en las condiciones de trabajo hacen que la evaluación de riesgos sea un desafío complejo. Esta falta de información detallada dificulta la formulación de medidas de control y prevención específicas para cada situación.

Para abordar los riesgos laborales asociados a la biorremediación en plantas eléctricas, es esencial implementar estrategias de capacitación y formación para los trabajadores, en relación con la manipulación segura de sustancias químicas y biológicas, así como el uso adecuado de equipo de protección personal. La aplicación de medidas de bioseguridad y la implementación de controles administrativos y técnicos también son esenciales para minimizar la exposición a los riesgos.

En futuras investigaciones, es necesario profundizar en la evaluación de la exposición real de los trabajadores a los diferentes riesgos, así como en la correlación entre la exposición y los efectos en la salud a largo plazo. Además, se deben desarrollar estrategias específicas de prevención y mitigación de riesgos que consideren las particularidades de cada proceso de biorremediación y planta eléctrica. La implementación de un enfoque multidisciplinario, que involucre a expertos en salud laboral, medio ambiente y biotecnología, permitirá abordar de manera más efectiva los desafíos relacionados con los riesgos laborales en el proceso de biorremediación en plantas eléctricas.

Conflicto de Interés: Los autores declaran que esta publicación no presenta ningún tipo de conflicto de intereses.

Financiación: El estudio estuvo financiado por la Universidad Libre Seccional Barranquilla

Contribución de los autores: Todos los autores participaron de manera equitativa en la recolección, interpretación, análisis de los datos y discusión del artículo.

Referencias

1. Estrella E, García OV, Garcés AP, Fernández BJ, Cañada ZJ, Acuña JA, et al. La pandemia de COVID-19, una oportunidad excepcional para la integración de la salud laboral y la salud pública. En: Analysis of the COVID-19 pandemic in Navarra. Gobierno de Navarra; 2023. p. 177-94.
2. Organización Internacional del Trabajo. Sustancias químicas y agentes biológicos nocivos (Administración e inspección del trabajo); 2023. Citado el 22 de noviembre de 2023; Disponible en: <https://www.ilo.org/global/topics/labour-administration-inspection/resources-library/publications/guide-for-labour-inspectors/harmful-chemical-and-biological-agents-substances/lang-es/index.htm>
3. Ministerio del Trabajo de Colombia. Riesgos laborales; 2023. Citado el 22 de noviembre de 2023. Disponible en: <https://www.mintrabajo.gov.co/relaciones-laborales/riesgos-laborales/fondo-de-riesgos-laborales>
4. González ENE, Mendoza LLR. Análisis de la exposición a factores de riesgo biológico en una empresa de administración y disposición de residuos 2013-2018. Trabajo de especialización. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad de Ingeniería, Especialización en Higiene, Seguridad y Salud en el Trabajo; Bogotá, D. C.; 2019. Disponible en: <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/24961/Gonz%C3%A1lezEspinosaNellyErika2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
5. Kumar V, Abbas AK, Aster JC. Robbins Patología humana. Elsevier; 2018.
6. Medlineplus.gov. Neumonía por hidrocarburos. Medlineplus.gov; 2023. Citado el 22 de noviembre de 2023. Disponible en: <https://medlineplus.gov/spanish/ency/article/001083.htm>
7. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. Resumen de Salud Pública: Hidrocarburos totales de petróleo. Cdc.gov; 2021. Citado el 22 de noviembre de 2023. Disponible en: https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs123.html
8. Murcia & Arenas SAS. Estadísticas riesgos laborales Colombia 2022; 2023. Citado el 22 de noviembre de 2023. Disponible en: <https://murciayarenas.com/noticias/estadisticas-riesgos-laborales-colombia-2022/>
9. Ministerio del Trabajo de Colombia. Normatividad de enfermedades laborales; 2023. Citado el 22 de noviembre de 2023. Disponible en: <https://www.minsalud.gov.co/proteccion-social/RiesgosLaborales/Paginas/afiliacion-sistema-general-riesgos-laborales.aspx>
10. FASECOLDA. Informe: Empresas Biorremediación; 2023.
11. Bobadilla SCA, Charria OVH, Garzón GLM. Identificación de factores de riesgo psicosocial en una clínica de alta complejidad. Psicología desde el Caribe. 2018; 35(2): 131-144. Doi: 10.14482/psdc.35.2.7650
12. Davie-Martin CL, Stratton KG, Teeguarden JG, Waters KM, Simonich SLM. Implications of bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbon-contaminated soils for human health and cancer risk. Environ Sci Technol. 2017; 51(17): 9458-68. Doi: 10.1021/acs.est.7b02956
13. Ojuederie O, Babalola O. Microbial and plant-assisted bioremediation of heavy metal polluted environments: A review. Int J Environ Res Public Health. 2017; 14(12): 1504. doi: 10.3390/ijerph14121504.
14. Hopf NB, Bourgard E, Demange V, Hulo S, Sauvain J-J, Levilly R, et al. Early effect markers and exposure determinants of metalworking fluids among metal industry workers: Protocol for a field study. JMIR Res Protoc. 2019; 8(8): e13744. doi: 10.2196/13744.
15. Anedda E, Carletto G, Gilli G, Traversi D. Monitoring of air microbial contaminations in different bioenergy facilities using cultural and biomolecular methods. Int J Environ Res Public Health. 2019; 16(14): 2546. Doi: 10.3390/ijerph16142546
16. Berumen-Rodríguez AA, Alcántara-Quintana LE, Pérez-Vázquez FJ, Zamora-Mendoza BN, Díaz de León-Martínez L, Díaz BF, et al. Assessment of inflammatory cytokines in exhaled breath condensate and exposure to mixtures of organic pollutants in brick workers. Environ Sci Pollut Res Int. 2022; 30(5): 13270-82. doi: 10.1007/s11356-022-23071-z.
17. Geng S, Xu G, You Y, Xia M, Zhu Y, Ding A, et al. Occurrence of polycyclic aromatic compounds and interdomain microbial communities in oilfield soils. Environ Res. 2022; 212(113191): 113191. Doi: 10.1016/j.envres.2022.113191
18. Guzmán-González Y. Riesgos y peligros laborales en termoeléctricas: una revisión de la literatura de 2007 a 2017. Rev Univ Ind Santander Salud. 2020; 239-50. Doi: 10.18273/revsal.v52n3-2020006
19. Bortey-Sam N, Ikenaka Y, Akoto O, Nakayama SMM, Asante KA, Baidoo E, et al. Oxidative stress and respiratory symptoms due to human exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Kumasi, Ghana. Environ Pollut. 2017; 228:311-20. Doi:10.1016/j.envpol.2017.05.036
20. Xu Y, Kåredal M, Nielsen J, Adlercreutz M, Bergendorf U, Strandberg B, et al. Exposure, respiratory symptoms, lung function and inflammation response of road-paving asphalt workers. Occup Environ Med. 2018; 75(7): 494-500. Doi: 10.1136/oemed-2017-104983
21. Tong R, Liu J, Ma X, Yang Y, Shao G, Li J, et al. Occupational exposure to respirable dust from the coal-fired power generation process: sources, concentration, and health risk assessment. Arch Environ Occup Health. 2020; 75(5): 260-73. Doi: 10.1080/19338244.2019.1626330
22. Idavain J, Julge K, Rebane T, Lang A, Orru H. Respiratory symptoms, asthma and levels of fractional exhaled nitric oxide in schoolchildren in the industrial areas of Estonia. Sci Total Environ. 2019; 650: 65-72. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.391

23. Mera-Mamián AY, Villarreal-Garza C, Segura-Cardona AM, Muñoz-Rodríguez DI, Rodríguez-Villamizar LA, Iván García-García H. Exposición a material particulado y su relación con el cáncer de mama. Mecanismos fisiopatológicos. *Med Lab.* 2023; 27(1): 13-24. Doi: 10.36384/01232576.616

24. Vizuet-García RA, Pascual-Barrera AE, Taco-Taco CW, Morales-Padilla MM. Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos a base de bacterias utilizadas como bioproductos. *Revista Lasallista de Investigación.* 2020; 17(1): 177-187. doi: 10.22507/rli.v17n1a19

25. Leachi HFL, Marziale MHP, Martins JT, Aroni P, Galdino MJQ, Ribeiro RP. Hidrocarburos policíclicos aromáticos y desarrollo de enfermedades respiratorias y cardiovasculares en trabajadores. *Rev Bras Enferm.* 2020; 73(3): e20180965. Doi: 10.1590/0034-7167-2018-0965

26. Escanciano SR. Sostenibilidad ambiental y prevención de riesgos laborales: reflexiones sobre el sector de la construcción ecológica. *Rev Minist Empl Segur Soc.* 2018; (138): 219-70.

27. Cota-Ruiz K, Nuñez-Gastelúm JA, Delgado-Rios M, Martínez-Martínez A. Biorremediación: actualidad de conceptos y aplicaciones. *Biotecnia.* 2018; 21(1): 37-44. Doi: 10.18633/biotecnia.v21i1.811

28. Padilla FMG, Alcón MS, Galán ÁMO, de la Rosa DJ, de Piedras A, Gómez BM, Pichardo JDR. Condiciones de vida y salud de la población inmigrante de los asentamientos de Huelva. *Rev Esp Salud Publica.* 2021; 95: e1-17.

29. Rodríguez-Gonzales A, Zárate-Villarroe SG, Bastida-Codina A. Biodiversidad bacteriana presente en suelos contaminados con hidrocarburos para realizar biorremediación. *Rev Cienc Ambient.* 2022; 56(1): 178-208. Doi: 10.15359/rca.56-1.9

30. Florez RAR. Bacterias y hongos utilizados en la biodegradación de hidrocarburos: Una Revisión de literatura y Análisis Bibliométrico. *Rev EIA.* 2023; 20(39): 14. Doi: 10.24050/reia.v20i39.1622

© Universidad Libre. 2023. Licence Creative Commons CC-by-nc-sa/4.0. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>



Jainer Enrique Molina-Romero: Docente de la Universidad Libre seccional Barranquilla, Magíster en Seguridad y Salud en el Trabajo, correo electrónico: jainer.molina@unilibre.edu.co

Luciana Hernández-Maldonado: Estudiante de la Maestría en Seguridad y Salud en el Trabajo, Universidad Libre seccional Barranquilla, Médico, especialista en Modelos tipos y diseños de investigación. Correo electrónico: lucianai.hernandezm@unilibre.edu.co

Mónica De Jesús Gómez-Barbosa: Docente de Maestría en Seguridad y Salud en el Trabajo Universidad Libre seccional Barranquilla, Doctora en Ciencias de la Educación, Magister en Educación, Especialista en Epidemiología, jefe para el Desarrollo de la Educación en Salud Universidad Libre Seccional Barranquilla, correo electrónico: monicad.gomez@unilibre.edu.co

Aracely García-Cuan: Docente de la Universidad Libre seccional Barranquilla, Magíster en Biología Molecular y Biotecnología, correo electrónico: aracely.garciac@unilibre.edu.co

Helmer David Agualimpia-Romero: Docente de la Corporación Universitaria Rafael Núñez Sede Barranquilla, Abogado de la Universidad Simón Bolívar, Magíster en Conflicto Social y Construcción de Paz de la Universidad de Cartagena, Estudiante de II Año del Doctorado en Gestión de la Tecnología y la Innovación de la Universidad Simón Bolívar, correo electrónico: helmer.agualimpia@unilibre.edu.co