

Evolución de las Tecnologías Utilizadas para la Absorción de Mercurio con Cenizas Vegetales en Suelos Contaminados por la Minería de Oro

Evolution of the Technologies Used for the Absorption of Mercury with Vegetable Ashes in Soils Contaminated by Gold Mining

DOI: <https://doi.org/10.17981/bilo.5.2.2023.04>

Fecha de recepción: 25/09/2023. Fecha de Publicación: 23/10/2023

Alex Castro-Sarmiento

Universidad de la Costa de Barranquilla, Colombia
acaastro10@cuc.edu.co

Fausto Pineda-Vides

Universidad de la Costa de Barranquilla, Colombia
fpineda1@cuc.edu.co

Jaime Andrade-Pérez

Universidad de la Costa de Barranquilla, Colombia
jandrade2@cuc.edu.co

Como citar en IEEE este artículo: A. Castro-Sarmiento y Otros, «Revisión Preliminar de la Literatura sobre la Capacidad de Carga en Playas del Pacífico y Caribe Colombiano,» *Boletín de Innovación, Logística y Operaciones*, vol. 5, n° 2, pp. 40-49, 2023. Online <https://revistascientificas.cuc.edu.co/bilo/article/view/5353>

Resumen

Uno de los contaminantes más peligrosos que se pueden encontrar como subproducto de la minería del Oro es El Mercurio (Hg), debido a su alto potencial de bioacumulación y los múltiples impactos negativos que puede ocasionar en el medio ambiente y en la salud del hombre. El presente documento tiene por objetivo evaluar las tecnologías para absorber Hg empleando Cenizas Vegetales (CV) en suelos contaminados con este elemento a causa de la minería. Esta investigación se constituye como una revisión de tipo descriptivo-documental puesto que busca revisar el aporte de algunos avances tecnológicos en las técnicas de remediación de suelos contaminados con Hg. Entre los hallazgos se destaca que la técnica de mayor predominancia es la que utiliza elaborados a partir de la cáscara de arroz, la cual absorbe eficientemente el Hg en los suelos, lodos y sedimentos. Gran parte de los estudios al respecto se centran en el análisis de los datos recolectados, pero el enfoque que se dará a este trabajo será puntualmente de las tecnologías utilizadas en el proceso mismo de absorción del Hg.

Palabras claves: Cenizas Vegetales, Absorción de Mercurio, Remediación de suelos, Contaminación y Minería.

Abstract

Mercury (Hg) is one of the most dangerous contaminants that can be found as a by-product of gold mining, due to its high potential for bioaccumulation and the multiple negative impacts it can have on the environment and human health. The objective of this paper is to evaluate the technologies used to absorb Hg using Vegetable Ash (VA) in soils contaminated with this element due to mining. This research is constituted as a descriptive review since it seeks to review the contribution of some technological advances in remediation techniques for soils contaminated with Hg. Among the findings, it stands out that the most predominant technique is the one made from rice husk, which efficiently absorbs Hg in soils, sludge, and sediments. A lot of the studies in this regard focus on the analysis of the data collected, but the focus that will be given to this paper will be specifically on the technologies used in the Hg absorption process itself.

Keywords: Mercury Absorption, Pollution and Mining, Soil Remediation, Vegetable Ash.

Introducción

El mercurio (Hg) es un metal de color plateado y brillante, el único en estado líquido a temperatura ambiente, comparado con otros metales en muy denso 13.53 g/Cm³, posee una baja soldabilidad en el agua 6x10⁻⁵ g/la 25 °C, no es buen conductor del calor, pero sí de la electricidad; es sumamente volátil de 1,22x10⁻³ mm a 20 °C, produce vapores incoloros e inodoros a partir de los 13 °C. Es considerado un oligoelemento altamente contaminante y perjudicial para el medio ambiente y la salud humana, este producto puede bioacumularse rápidamente en la cadena alimentaria. La población humana en la que representa mayores riesgos de afectación a la salud son las mujeres en estado de gestación y los niños [1]. La mayor parte del Hg se encuentra en las plantas que no poseen mucha movilidad [2], el Hg acumulado en organismos fotosintéticos se encuentra en forma de Hg (0), Hg orgánico y Hg (II) [3], sin embargo, se requieren más estudios para entender cómo las plantas absorben el Hg y que tan importante es la deposición seca de cenizas volantes para las plantas. Se estima que la contaminación por Hg pone en riesgo a cerca de 8 millones de personas en todo el mundo [3]. La inhalación o ingesta de Hg produce efectos nocivos en los sistemas digestivo, nervioso e inmunológico, puede incluso llegar afectar los riñones y pulmones hasta el grado de ocasionar la muerte [4], el metilmercurio (MeHg) se encuentra clasificado como elemento posiblemente cancerígeno por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer. El Hg se puede presentar en 3 estados de oxidación estables: Estado elemental (Hg(O)), mercurioso Hg²⁺(I) y mercúrico Hg²⁺(II); en la naturaleza se encuentra en estado elemental [5].

Tabla 1. Principales Formas del Hg en la Naturaleza. Fuente: Elaboración propia.

Forma Elemental	Forma Inorgánica	Formas Orgánicas u Organomercuriales
Hg(0)	HgS	CH ₃ Hg
	HgO	CH ₃) ₂ Hg
	HgCl ₂	CH ₃ HgCl
	Hg(OH) ₂	CH ₃ HgOH

Metodología

El presente estudio se basó en un investigación descriptivo-documental, fundamentada en una revisión preliminar de la literatura [6] [7] acerca de la evaluación de tecnologías empleadas para la absorción de Mercurio con Cenizas Vegetales en suelos contaminados debido a la minería de oro. Se tomó información secundaria en la base de datos Scopus siguiente los siguientes pasos:

- ✓ *El protocolo de búsqueda se estableció a partir de la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuáles son las tecnologías más efectivas empleadas hasta la fecha para la absorción de mercurio en suelos contaminados debido a la minería de oro, utilizando cenizas vegetales como material de tratamiento? Además, se establecieron los criterios de inclusión y exclusión para el estudio.*
- ✓ *Esta fase implicó realizar la búsqueda de la información en la base de datos de Scopus utilizando la siguiente estrategia de búsqueda: (“Soils Contaminated by Gold OR absoeption of Mercury with Vegetable Ashes, Technologies Used”).*
- ✓ *Los artículos seleccionados fueron en acceso abierto, publicados en los últimos 5 años (2019-2023), y disponibles en idioma inglés y español.*
- ✓ *Por último, la información de los 10 manuscritos seleccionados para la revisión se describió detalladamente en el capítulo de resultados de esta investigación. Cada estudio fue analizado minuciosamente, exponiendo las principales metodologías y resultados destacados. Las tecnologías empleadas en la absorción de mercurio con cenizas vegetales en suelos contaminados por la minería de oro, así como sus ventajas y limitaciones.*

Resultados

El crecimiento de la población mundial, la continua producción industrial, la agricultura, y sobre todo la alta demanda de los recursos minerales como el oro, por ejemplo, dan origen al desarrollo de las actividades mineras en todo el mundo. La minería es una de las actividades más antiguas desarrolladas por el hombre y que genera mayores impactos hacia el medio ambiente. Por lo general, la minería produce cambios significativos en todo el ecosistema natural, afectando los suelos para la producción agrícola y la seguridad alimentaria [5].

La minería de oro es una actividad que ocurre casi en todo el planeta, muy codiciada desde la antigüedad por lo que este mineral representa. El oro es un metal precioso, y uno de los más comercializados, su costo ha venido experimentando un aumento en los últimos años, lo cual ha volcado a los mineros de muchos países alrededor del mundo hacia un incremento de la actividad extractiva y se espera que la demanda siga en aumento. A nivel mundial la mayor participación en la producción de oro está representada por los productores artesanales, quienes aportan un 35 % del oro extraído anualmente. La minería de oro es una actividad en la cual participan alrededor de 15 millones de personas, incluyendo mujeres y niños, en países como Ghana, participan aproximadamente 1 millón de personas [8]. En el proceso de extracción de oro es utilizado el Hg debido a que abarata los costos y su aplicación es más fácil y puede ser realizada por un solo operario [9]. La manera de emplear el Hg en la extracción de oro es amalgamando oro y Hg, paso seguido se calienta la mezcla hasta conseguir calentar el punto de ebullición del Hg para que este se evapore dejando expuesto el oro, durante este procedimiento parte del Hg pasa al agua, otra parte a la atmósfera al momento de evaporarse, y otra proporción se infiltra en los suelos [10]. Lo anterior ocasiona que la actividad extractiva del oro se constituya como la principal fuente de contaminación por Hg en el mundo, y por ende acentúe todas las problemáticas relacionadas con los riesgos para la salud y los impactos negativos para el medio ambiente [11].

La contaminación con metales pesados se ha convertido un tema de gran preocupación este fenómeno se acrecentó en países en vía de desarrollo puesto que los procesos para descontaminar los suelos con Hg son poco tecnificados, accesibles, normativos y desconocidos, además de que el Hg no se degrada de forma natural. De acuerdo con la comunidad internacional la remediación de suelos contaminados con Hg es un tema que requiere del uso de tecnologías de primera guardia para reducir los tiempos de exposición y el costo asociado a la remediación de los suelos contaminados con Hg.

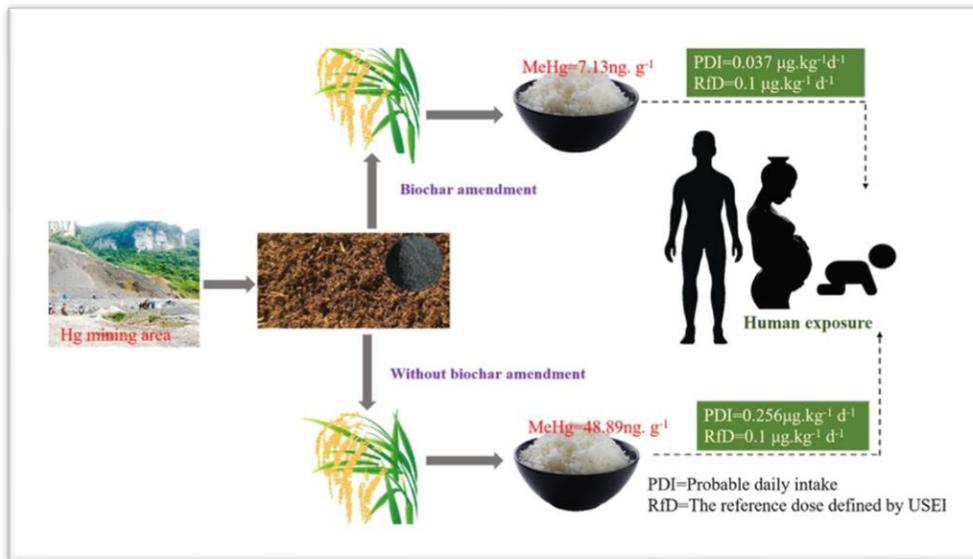


Figura 1. Consecuencias del Hg en Suelos Agrícolas, Alimentos y el Hombre. Tomado de [12].

De este modo, algunas de las formas de tratar el suelo son: La remediación física, la cual trata de reemplazar el suelo degradado, la remediación química que implica la lixiviación y estabilización química del suelo y la remediación biológica que se refiere al uso de plantas para eliminar el Hg del suelo. Los elementos más novedosos, son aquellos materiales que tienen una gran porosidad y una mayor área de superficie para la absorción. También, es importante conocer otros factores como la fuente de generación, la estabilidad y la reutilización [13].

La remediación de suelos puede ser considerada como aquella práctica realizada para descontaminar los suelos expuestos a altas concentraciones de metales pesados. La remediación física se caracteriza por poseer equipos simples, de fácil operación y bajo costo, entre estas técnicas se destacan las siguientes: a) la desorción térmica del suelo la cual supone añadirle energía calórica a las muestras del suelo para evaporar el Hg por su alta volatilidad; este método se le considera es un tratamiento corto, seguro y eficiente, b) sustitución de suelo puesto es un método que consiste en la remoción de suelos altamente contaminados y agregar uno nuevo para reducir los altos nivel de contaminación de metales pesados [14]. La remediación química consiste en agregar reactivos para generar procesos de precipitación, absorción, oxidación, reducción, polimerización y complejación, entre los casos más comunes se encuentra: a) la lixiviación química la cual consiste en añadir reactivos a base de ácidos, bases, sales, quelantes o tensioactivos para extraer los metales pesados del suelo [15], b) estabilización química es un método que se utiliza para convertir metales pesados en formas insolubles, inamovibles y menos tóxicas [16], c) barrera reactiva permeable a la remediación electrocinética es una técnica utilizada para agregar bajas cargas de voltaje al suelo por medio de electrodos los iones de metales pesados son atrapados por los electrodos [17] y d) oxidación/reducción química es el uso del redox químico, es una práctica un poco limitada por su alto costo [18].

La remediación biológica puede ser considerada como aquella técnica utilizada en el suelo para remediarlo mediante el uso de plantas, animales y microorganismos, se destacan las siguientes técnicas: a) Fitorremediación que se basa en el uso de organismos fotosintéticos para absorber Hg del suelo por medio de las raíces de las plántulas [19], remediación microbiana consiste en la bioabsorción, bioacumulación, biovolatilización, biolixiviación y biomineralización para capturar iones de Hg por parte de microorganismos. Se centra la atención en la remediación química del suelo incluyendo el uso del BC como principal agente para la absorción del Hg. El BC posee muchos beneficios para el suelo y las plantas, no solo se limita a mejorar el crecimiento y productividad de las plántulas, sino que juega un papel protagónico en la protección de la planta contra el estrés abiótico como la sequía, lluvias torrenciales y la salinidad; Estudios recientes identifican los beneficios del BC en la absorción de Hg en suelos contaminados [19]. La remediación de suelos contaminados con Hg por medio de CV, surge como una práctica viable

para descontaminar suelos con Hg debido a su bajo costo por la empleabilidad de biomasa local y su efectividad en la absorción de Hg en suelos [2]. El objetivo de este trabajo es evaluar el desarrollo de las tecnologías y herramientas utilizadas para la absorción de Hg con CV en suelos contaminados por la minería de oro.

TÉCNICAS Y TECNOLOGÍAS EN LA REMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON HG. A lo largo de la historia se han desarrollado tecnologías que han permitido ampliar el espectro y profundidad de los estudios acerca del Hg y sus procesos asociados.

La Pirólisis, la Espectrofotometría, el desarrollo del Microscopio Electrónico de Barrido, la Cromatografía, la Espectroscopia de Fluorescencia Atómica, entre otros, han sido de gran ayuda en el desarrollo de estas técnicas de estudio del Hg, su absorción en suelos, sus procesos de bioacumulación y su remediación. Es importante conocer la definición de cada una de las tecnologías implicadas en este estudio para saber su funcionalidad y utilidad desde el punto de vista experimental y entender mejor cómo el avance tecnológico ha permitido la evolución de las técnicas de remediación de suelos con el uso de CV. La Pirólisis se conoce como un proceso termoquímico mediante el cual se transfiere grandes cantidades de energía calorífica a la materia en un tiempo determinado para generar la carbonización del mismo, este es un proceso desarrollado en ausencia de oxígeno; que consta de 3 etapas: en la primera se realiza la dosificación y el agregado de materia prima, en la segunda se transforma la masa orgánica y en la tercera se obtienen y separan los productos (coque, bio-aceite y gas) [20]. A continuación, se puede observar un equipamiento de Pirólisis en un laboratorio previo a la fase experimental.



Figura 2. Equipos de Pirólisis Durante el Proceso Experimental. Tomado de [21].

La Pirólisis como proceso tecnológico ha aportado un avance significativo en el estudio de las CV, pues permite generarlas de manera controlada y aislada evitando riesgos de contaminación, esto es fundamental a la hora de procesar muestras para el uso posterior en la absorción de Hg pues la limpieza de la muestra garantiza una medida más precisa de la cantidad de Hg antes y después del proceso de mezcla con suelos contaminados con Hg, permitiendo así evaluar de forma más exacta la capacidad de absorción de dicho elemento. Por su parte la espectrofotometría es considerada por muchos como el instrumento que revolucionó la química, la técnica se utiliza para visualizar la cantidad de luz transmitida o absorbida en una longitud de onda la cual es proporcional a la concentración del material objeto de estudio.

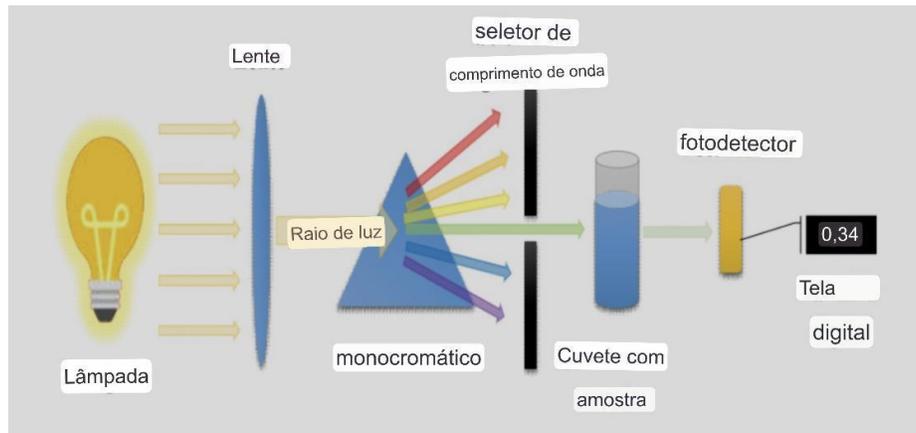


Figura 3. Proceso de Espectrofotometría. Tomado de [22].

En la Figura 3 se puede observar un ejemplo claro de un Espectrofotómetro; gracias a este instrumento se puede analizar diferentes muestras de fluidos para conocer la procedencia de las partículas disueltas.

La tecnología de los Espectrofotómetros al igual que el anterior proceso, ha contribuido al estudio de la absorción del Hg en suelos contaminados, pues permite determinar la presencia y medir las cantidades de Hg en las muestras de los suelos o aguas con cierto grado de precisión. Seguidamente la Espectrometría de Fluorescencia Atómica se usa para la detección de metales pesados empleando un análisis preciso de las trazas metálicas [25]. Esta es importante también dado que el Hg es un elemento pesado y en algunos casos es preciso la utilización de esta tecnología en particular para medir con precisión la presencia y cantidad de Hg. En cuanto a los procesos de observación de alta precisión que se pueden usar para evaluar la presencia y cantidad de Hg en las muestras de suelo y agua, aparece también la Microscopía de Barrido. Esta además permite observar y estudiar particularmente las superficies, configuraciones y formas de los compuestos asociados al Hg en las muestras de suelos o aguas contaminadas.

La Microscopía de Barrido o Scanning (SEM) el cual consiste en la utilización de un haz de electrones, a diferencia de un haz de luz, este es un instrumento que tiene sus orígenes en 1965 de la mano de Cambridge Instrument Co, Sin embargo, los cimientos de sobre los que fue desarrollado este instrumento datan de 1935, después de que Knoll y Ruska desarrollasen el microscopio electrónico de transmisión (TEM), es un equipo que utiliza diferentes electrones por medio de luz para identificar los objetivos.



Figura 5. Microscopía de Barrido o SEM. Tomado de [23].

Por último, se podría mencionar como avance tecnológico que ha contribuido al avance en el estudio de la absorción de Hg en suelos contaminados, la cromatografía, que es un método de separación de mezclas complejas por medio de la identificación y determinación de los componentes [23]. Con todas estas tecnologías que desde sus especificaciones y aplicaciones han permitido estudiar la presencia, forma, cantidad y configuración de elementos como el Hg en muestras de suelo, se ha potenciado la experimentación y el perfeccionamiento de las técnicas de remediación de suelo. La remediación química del suelo con el uso de CV en el suelo consiste en una técnica de uso de múltiples procesos de absorción, oxidación, precipitación, reducción, entre otros para eliminar el Hg presente en el suelo. Dentro de las técnicas que han contribuido al estudio de la remediación de suelos contaminados con Hg se destacan:

Uso de BC a base de cáscara de arroz: Algunas Investigaciones que utilizan BC a base de cáscara de arroz para absorber Hg, elaborado a partir de la toma in situ de muestras de Arenas arcillosa contaminados con Hg de 20,2 mg/kg, la elaboración del CV se produjo a 300, 500 y 700 ° C en este estudio se simuló una escorrentía de lluvia debido a los condiciones climatológicas en el área de estudio los hallazgos evidencian la reducción en la concentración de Hg en la escorrentía entre un 20,9 y un 31,2 % [24]. De igual forma, otro estudio en similares condiciones de la elaboración del CV a partir de cáscara de arroz en suelos contaminados e inundables con Hg, se desarrolló la pirólisis a 500 a 600 ° C para este caso el CV se aplica y las muestras (suelo y plántulas) se toman transcurrido 120 días; para estudiar el Hg Total se toman muestras en concentraciones acuosas con el fin de realizar espectrometría de fluorescencia atómica de vapor frío; los hallazgos destacan que el CV disminuyó el contenido de Hg en los tejidos de las plantas de arroz, particularmente en el arroz Pulido, esto quiere decir que se controló la transferencia de Hg en el suelo. Otros estudios se centran en los lixiviados de vertederos con carbón activado y turba para este caso se elaboró el CV recolectando cáscara de arroz en el área de influencia y se calentó en un horno a 300, 500 y 700 ° C para estimar el Hg en el suelo se utilizó nuevamente espectroscopia de fluorescencia atómica de vapor frío los resultados muestran que el Hg se redujo un 81 % durante el proceso de absorción, la capacidad de absorción es de 114 mg/g y 102 mg/g esto demuestra la importancia del carbón activado y la turba para absorber Hg a un bajo costo para el tratamiento de vertederos [25].

Por otro lado, se destaca un estudio que tomó como BC la recolecta de piñas y muestras de horizonte del suelo a 26 a 40 cm fue de 41,0 mg/Kg se preparó en un horno de 200 a 500 ° C, para este caso particular el Hg se midió con espectrometría de absorción atómica utilizando un analizador directo de Hg DMA-80, los resultados sobre el impacto de la adición de BC en la movilización de Hg fue limitado debido a que no se observó una disminución significativa de Hg, MeHg y EtHg después de tratar el suelo con los diferentes BC [26]. Mientras tanto existen registros de otros autores que prefieren el BC ya realizado en donde se produjeron pirolizando pinos a 600 ° C, los carbones activados fueron más efectivos que el BC en la absorción de Hg y esto se tradujo en una reducción moderada de Hg en el agua inundable en el rango de 94 a 98 % para sedimentos con baja densidad nativa. Los BC no activados fueron tan efectivos como los carbones activados por vapor para la sorción de MeHg.

Las reducciones pronosticadas de MeHg en el agua intersticial fueron del 73 al 92 % para sedimentos con baja densidad nativa [27]. De la misma manera este estudio se realizó por medio de la compra del BC en el mercado local donde se resalta una derivada del carbón bituminoso y otro de cáscara de coco, estas muestras fueron aplicadas en suelos con presencia de lodos; ambos han sido reportados para exhibir fuerte absorción de Hg y MeHg a base de carbón vegetal y cáscara de coco en suelos contaminados con Hg de 20 g/gdw de carbono orgánico total y absorbancia fueron sometidas las muestras a UV en $\lambda = 280$ nm con un espectrofotómetro Cary 4E UV-vi. espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente; los resultados evidencian una reducción en el Hg ambiental y 201 Concentraciones de Hg en agua intersticial [27]. Algunos estudios han optado por emplear en la BC enzimas del maíz, las muestras de suelo se dirigieron con una solución de ácido concentrado, la concentración de Hg en el suelo y la planta se probó utilizando Thermo Fisher ice-3500 (norma en China) de acuerdo con las instrucciones proporcionadas por el fabricante, la concentración de MeHg en el suelo se determinó mediante cromatografía líquida de alta resolución-espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente, se utilizó el método de extracción continua de cinco pasos de Tessier para analizar las formas químicas de Hg en el suelo. El BC de rastrojo de maíz disminuyó la migración de Hg del suelo a la solución de lixiviación y las espinacas, y el efecto de pasivación de una concentración del 7 % de BC de rastrojo de maíz fue el mejor. Además, el BC de rastrojo de maíz alivió el aumento de metil Hg causado por el Hg en el suelo por último el BC de rastrojo de maíz puede aumentar la seguridad comestible de las espinacas al inmovilizar Hg en el suelo y usarse como una enmienda orgánica.

Además, otras investigaciones se han centrado en realizar experimentos en laboratorios usando BC a partir de madera de roble a 700 ° C, se preparó una solución de madera de Hg en una solución acuosa. Los resultados muestran que la capacidad de que la tasa de absorción disminuye empleando BC de roble preparado en solución acuosa de polisulfuro es importante pensar en la estabilización del BC de roble a largo plazo.

Conclusión

La ciencia cada vez más realiza investigaciones enfocadas en el desarrollo e innovación de tecnologías y materiales para la remediación de suelos contaminados con Hg, se destaca el uso de diferentes materiales que cuentan con alta porosidad, área de superficie y sitios activados para la absorción. La capacidad de absorción es la variable más importante al momento de estudiar los distintos materiales; además, es importante la identificación de su generación en la fuente, la estabilidad y la reutilización del Hg en el suelo. Hay que destacar que en comparación con tecnologías de remediación convencionales como: La absorción con carbón activado y la desorción térmica hay métodos que demuestran ser más viables con respecto al cuidado del medioambiente y su costo debido a que utilizan organismos como: bacterias, plantas y animales.

Los indicadores de sostenibilidad en suelos contaminados por Mercurio debido a la minería de oro son cruciales para evaluar los diferentes impactos ambientales, social, económicos y en la salud. Gestionar su remediación efectiva de la contaminación y garantizar el cumplimiento de regulaciones ambientales. Estos indicadores abordan aspectos claves, como la concentración de mercurio en el suelo, la calidad del agua, la biodiversidad y la concienciación pública, permitiendo un enfoque integral para minimizar los impactos adversos y promover prácticas más sostenibles. Por otro lado, es importante destacar que los indicadores que han tenido mayor relevancia en cuanto a desarrollo y utilidad han sido los de tipo ambientales.

Finalmente, este trabajo pone en evidencia una latente preocupación por parte de los países con respecto a la contaminación de los suelos por Hg producto de la minería de oro y sus impactos en la agricultura, la biodiversidad, la seguridad alimentaria y la salud humana. Este estudio cumplió con el objetivo de la investigación debido a que se logra identificar las diferentes tecnologías y herramientas de mayor utilidad en investigaciones que abarquen la bioremediación de suelos contaminados con Hg utilizando CV en zonas donde hay presencia de minería de oro. De igual forma, se puede precisar que las herramientas más comunes que han contribuido al desarrollo de las técnicas de remediación de suelos son: La Pirólisis, la Espectrofotometría, el desarrollo del Microscopio Electrónico de Barrido, la Cromatografía y la Espectroscopia de Fluorescencia Atómica, las cuales han sido de gran utilidad al momento de analizar suelos contaminados con Hg y MeHg. El aporte de todos los instrumentos a la ciencia ha sido significativo pero entre ellos se destaca el espectrofotometría como un equipo que revolucionó la forma de estudiar las moléculas presentes en el suelo y agua. No obstante, se destaca que la principal materia prima para elaboración de BC son las cáscaras de arroz, piñas, madera, hierbas y frutos los cuales son útiles para la remediación de suelos, aunque el más eficiente es el BC a partir de la cáscara de arroz en medios acuosos mediante técnicas de remediación químicas. Otros datos curiosos es que este estudio muestra el interés del sector agrario en remediar suelos con vocación agrícola contaminados con Hg, por otro lado, se destaca que todos los estudios consultados utilizan el uso de la estadística en el tratamiento de los datos recolectados.

Referencias Bibliográficas

- [1] C. Holmes, D. Jacob, R. Mason y D. Jaffe, «Sources and deposition of reactive gaseous mercury in the marine atmosphere,» *Atmospheric Environment*, vol. 43, n° 14, pp. 1-8, 2009.
- [2] R. Li, H. Wu, J. Ding, W. Fu, L. Gan y Y. Li, «Mercury pollution in vegetables, grains and soils from areas surrounding coal-fired power plants,» *Scientific Reports*, vol. 7, n° 1, pp. 1-9, 2017.
- [3] G. Qiu†, X. Feng, L. Ping y w. Shaofeng , «Methylmercury accumulation in rice,» *Journal of Agricultural and*

- Food Chemistry*, vol. 56, n° 7, pp. 1-9, 2008.
- [4] F. Beckers y J. Rinklebe, «Cycling of mercury in the environment: Sources, fate, and human health implications: A review,» *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 47, n° 2, pp. 1-10, 2017.
- [5] X. Ganoa Martínez, «El mercurio como contaminante global. Desarrollo de metodologías para la determinación en suelos contaminados y estrategias para la reducción de su liberación al medio ambiente,» Universidad Autónoma de Barcelona, Barcelona, 2004.
- [6] J. R. Andrade Pérez, J. Pineda Vides y A. Troncoso-Palacio, «Revisión Preliminar de la Literatura sobre el Eco Turismo en Humedales Costeros y su Impacto en la Salud,» *Revista Científica en Salud*, vol. 1, n° 2, pp. 1-10, 2022.
- [7] J. Mier Tous, F. Pineda Vides, J. Hernández Ureche, A. Troncoso Palacio, J. Andrade Pérez y J. I. Padilla Barrios, «Una Revisión Preliminar de la Literatura Sobre los Retos en la Agricultura Sostenible de América Latina,» *Boletín de Innovación, Logística y Operaciones*, vol. 5, n° 1, pp. 1-10, 2023.
- [8] J. McQuilken y G. Hilson, «Artisanal and small-scale gold mining in Ghana,» Ghana, 2016.
- [9] M. G. Velásquez Ramírez, C. M. Vega Ruiz, R. Corvera Gomringer, M. Pillaca, E. Thomas, P. M. Stewart, L. A. Gamarra Miranda, R. F. Dañobeytia, J. A. Guerrero Barrantes, M. Chinen Gushiken y J. Vasquez Bardales, «Mercury in soils impacted by alluvial gold mining in the Peruvian Amazon,» *Journal of Environmental Management*, vol. 288, n° 15, pp. 1-10, 2021.
- [10] H. Gibb y K. G. O'leary, «Mercury Exposure and Health Impacts among Individuals in the Artisanal and Small-Scale Gold Mining Community: A Comprehensive Review,» *Environmental Health Perspectives*, vol. 122, n° 1, pp. 1-6, 2014.
- [11] D. Leiva Tafur y R. M. López Lapa, «Metales pesados en la producción ganadera lechera y riesgos a la salud humana,» *Revista de Ciencia Latina*, vol. 6, n° 1, pp. 1-10, 2022.
- [12] Y. Gao, P. Wu, P. Jeyakumar, N. Bolan, N. Bolan, H. Wang y B. Gao, «Biochar as a potential strategy for remediation of contaminated mining soils: Mechanisms, applications, and future perspectives,» *Journal of Environmental Management*, vol. 313, n° 1-13, 2022.
- [13] Y. Gong, D. Zhao y W. Qilin, «An overview of field-scale studies on remediation of soil contaminated with heavy metals and metalloids: Technical progress over the last decade,» *Water Research*, vol. 143, n° 15, pp. 1-11, 2018.
- [14] Dermont, M. Bergeron, G. Mercier y L. Richer, «Soil washing for metal removal: A review of physical/chemical technologies and field applications,» *Journal of Hazardous Materials*, vol. 152, n° 1, pp. 1-6, 2008.
- [15] Faisal I Khan, F. I. Khan, T. Husain y R. Hejazi, «An overview and analysis of site remediation technologies,» *Journal of Environmental Management*, vol. 71, n° 2, pp. 1-13, 2004.
- [16] D. Wen, F. Rongbing y L. Qian, «Removal of inorganic contaminants in soil by electrokinetic remediation technologies: A review,» *Journal of Hazardous Materials*, vol. 401, n° 5, pp. 1-8, 2021.
- [17] A. Marques, A. Ranguel y P. Castro, «Remediation of Heavy Metal Contaminated Soils: An Overview of Site Remediation Techniques,» *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 41, n° 1, pp. 1-12, 2011.
- [18] G. Chopapala, N. Bolan, S. Bibi, q. Muhammad y Z. Rengel, «Cellular Mechanisms in Higher Plants Governing Tolerance to Cadmium Toxicity,» *Critical Reviews in Plant Sciences*, vol. 33, n° 2, pp. 1-12, 2014.
- [19] Y. Xing, J. Wang, M. Sabry, B. Shaheen y F. Xinbin, «Mitigation of mercury accumulation in rice using rice hull-derived biochar as soil amendment: A field investigation,» *Journal of Hazardous Materials*, vol. 388, n° 1, pp. 1-13, 2020.
- [20] M. Klug, «Pirólisis, un proceso para derretir la biomasa,» *Química*, vol. 26, n° 1, pp. 1-7, 2012.
- [21] J. C. Figueroa Guevara, «Obtención de líquido combustible a partir de la pirólisis térmica de residuos plásticos de polipropileno,» *DSPACE*, pp. 1-35, 2012.

- [22] R. D. García , «nstrumentos que revolucionaron la química: la historia del espectrofotómetro,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.redalyc.org/journal/933/93368279004/html/>.
- [23] R. Rigo-Bonnin, F. Canalias-Reverter, S. Esteve-Poblador, F. Gella-Tomás, B. González-de-la-Presa y R. López-Martínez, «Desarrollo de procedimientos de medida basados en la cromatografía líquida de alta resolución,» *Revista del Laboratorio Clínico*, vol. 11, n° 3, pp. 137-146, 2017.
- [24] S. Zhengtao , Z. Zhuorong y Z. Mengdi, «Effect of production temperature and particle size of rice husk biochar on mercury immobilization and erosion prevention of a mercury contaminated soil,» *Journal of Hazardous Materials*, vol. 420, n° 1, pp. 1-10, 2021.
- [25] A. Mochammad y . Y. Gusti Wibowo, «Mercury removal using modified activated carbon of peat soil and coal in simulated landfill leachate,» *Environmental Technology & Innovation*, vol. 24, n° 1, pp. 1-10, 2021.
- [26] «Impact of biochar on mobilization, methylation, and ethylation of mercury under dynamic redox conditions in a contaminated floodplain soil,» *Environment International*, vol. 127, n° 1, pp. 1-11, 2019.
- [27] J. Gomez, C. Yupangui y B. Beckingham , «Evaluation of Biochars and Activated Carbons for In Situ Remediation Of Sediments Impacted With Organics, Mercury, And Methylmercury,» *Environmental science & technology*, vol. 47, n° 23, pp. 1-13, 2013.