XXX

Potencial de secuestro de carbono orgánico y biorremediación de suelos degradados por minería aurífera aluvial mediante la aplicación de biochar de biomasa residual en Madre de Dios

Jose Victor Quiroz Ramirez

XXX

Potencial de secuestro de carbono orgánico y biorremediación de suelos degradados por minería aurífera aluvial mediante la aplicación de biochar de biomasa residual en Madre de Dios

Jose Victor Quiroz Ramirez

RESUMEN

La presente revisión narrativa sintetiza el potencial del biochar de biomasa residual como una alternativa biotecnológica y de economía circular para la restauración de suelos degradados por la minería aurífera aluvial en la región de Madre de Dios. La extracción de oro genera pasivos ambientales caracterizados por la pérdida total de horizontes edáficos, compactación, acidez extrema y contaminación por mercurio. Frente a estas condiciones adversas, la incorporación de biocarbón ofrece un doble beneficio sinérgico: actúa como un sumidero permanente de carbono orgánico estable frente a la mineralización tropical y funge como un agente fisicoquímico restaurador que mejora la retención hídrica, incrementa la capacidad de intercambio catiónico e inmoviliza metales pesados mediante procesos de adsorción y complejación superficial. Asimismo, se discuten los desafíos logísticos de la biomasa local, la variabilidad de la pirólisis y su integración en políticas públicas de mitigación climática y remediación ambiental. Los hallazgos confirman que esta enmienda carbonosa optimiza la fertilidad edáfica y fomenta la resiliencia ecológica a largo plazo en ecosistemas amazónicos intervenidos.

Palabras clave: Biochar, minería aurífera, Madre de Dios, secuestro de carbono, biorremediación de suelos.

ABSTRACT

TThis narrative review synthesizes the potential of biochar derived from residual biomass as a biotechnological and circular economy alternative for restoring soils degraded by alluvial gold mining in the Madre de Dios region. Gold extraction generates environmental liabilities characterized by the total loss of soil horizons, compaction, extreme acidity, and mercury contamination. Faced with these adverse conditions, the incorporation of biochar offers a synergistic dual benefit: it acts as a permanent sink for stable organic carbon—resistant to tropical mineralization—and serves as a physicochemical restorative agent that improves water retention, increases cation exchange capacity, and immobilizes heavy metals through adsorption and surface complexation processes. Additionally, the review discusses logistical challenges regarding local biomass, pyrolysis variability, and the integration of biochar into public policies for climate mitigation and environmental remediation. The findings confirm that this carbonaceous amendment optimizes soil fertility and fosters long-term ecological resilience in disturbed Amazonian ecosystems.

Keywords: Biochar, gold mining, Madre de Dios, carbon sequestration, soil bioremediation.

INTRODUCCIÓN

La región de Madre de Dios, situada en la Amazonía sur peruana, experimenta una de las tasas más severas de deforestación y degradación de suelos como consecuencia directa de la expansión descontrolada de la minería aurífera aluvial. Esta actividad extractiva, tanto artesanal como mecanizada a gran escala, arrasa con extensas franjas de bosques tropicales y llanuras aluviales, eliminando por completo la capa superficial rica en nutrientes y alterando de manera irreversible la morfología del paisaje. Como resultado, los ecosistemas terrestres quedan reducidos a complejos de montículos estériles de grava, arena y rocas desprovistos de cobertura vegetal y de actividad biológica nativa.

Desde el punto de vista edafológico, las consecuencias de esta intervención antrópica son drásticas. Los suelos afectados sufren una alteración profunda de sus propiedades físicas, químicas y biológicas, destacando la pérdida casi total de carbono orgánico,

la destrucción de los agregados estables y una compactación severa que limita la infiltración hídrica. Asimismo, se registra una marcada alteración del pH, una intensa lixiviación de nutrientes esenciales y, de forma crítica, la presencia de concentraciones tóxicas de mercurio y otros metales asociados que se emplean o movilizan durante el proceso de amalgamación del oro. Estas condiciones restringen la sucesión vegetal natural e impiden la recuperación espontánea de los servicios ecosistémicos en la zona.

Ante este panorama de pasivos ambientales, el uso de enmiendas orgánicas especializadas ha ganado notoriedad científica, destacando el biochar (o biocarbón) como una alternativa biotecnológica promisoria. El biochar se define como un material carbonáceo rico en carbono recalcitrante, obtenido mediante la pirólisis de biomasa residual bajo condiciones de ausencia o limitada presencia de oxígeno. Su implementación se alinea de manera directa con los principios de la economía circular, ya que permite valorizar residuos agroindustriales y forestales locales —como cáscaras de frutos o restos maderables— transformándolos en un insumo de alta estabilidad para la agricultura regenerativa y la restauración ecológica.

No obstante, a pesar de los avances globales en el uso de enmiendas carbonosas, existe una brecha en la consolidación del conocimiento científico enfocado en la respuesta específica del biochar frente a las condiciones edafoclimáticas extremas de los suelos mineros tropicales de la Amazonía peruana. Por lo tanto, el objetivo de la presente revisión narrativa es sintetizar la literatura científica reciente para evaluar el potencial de la aplicación de biochar de biomasa residual, analizando de forma integral su doble función como sumidero de carbono orgánico a largo plazo y agente biorremediador capaz de inmovilizar contaminantes y reactivar la fertilidad edáfica en Madre de Dios.

METODOLOGÍA

Para el desarrollo de esta revisión narrativa, se diseñó una estrategia de búsqueda sistemática y rigurosa orientada a recopilar la literatura científica y técnica más relevante vinculada al uso de enmiendas carbonosas en ecosistemas tropicales perturbados. La estrategia de búsqueda de información se estructuró mediante la combinación lógica de términos clave y operadores booleanos en los idiomas español e inglés. Los ejes temáticos fundamentales consideraron los descriptores: "biochar", "biocarbón", "minería aurífera", "Madre de Dios", "secuestro de carbono", "biorremediación de

suelos", "suelos degradados" y "mercurio". Estas palabras clave permitieron capturar tanto los aspectos fisicoquímicos de la enmienda como las particularidades geográficas y ambientales del área de estudio.

Las fuentes de datos y bases consultadas comprendieron las principales plataformas académicas de alto impacto internacional, tales como Scopus, Web of Science, SciELO y Google Scholar. Adicionalmente, se incorporó literatura gris de instituciones técnicas y gubernamentales de ámbito nacional y regional, destacando los reportes del Ministerio del Ambiente (MINAM), el Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana (IIAP) y el Centro de Innovación Científica Amazónica (CINCIA), entidades que monitorean de forma continua pasivos ambientales en la región suroriental del Perú [cite: .

Para garantizar la pertinencia y calidad de los documentos analizados, se establecieron criterios de inclusión y exclusión bien definidos. Dentro de los criterios de inclusión se consideraron:

- Trabajos de investigación original, artículos de revisión y reportes técnicos enfocados en la Amazonía o en ecosistemas tropicales húmedos con características edafoclimáticas análogas.
- Estudios centrados específicamente en la degradación edáfica por minería aluvial de oro.
- Ensayos experimentales o teóricos que evaluaran el desempeño del biochar derivado de biomasa residual.
- Publicaciones científicas comprendidas preferentemente en el periodo entre 2016 y 2026.

Por el contrario, se aplicaron criterios de exclusión para descartar investigaciones desarrolladas en regiones templadas o boreales cuyas condiciones de temperatura, humedad y evolución de suelos (como los Podzoles o Alfisoles de zonas frías) distan radicalmente de los Ultisoles y Oxisoles tropicales. Asimismo, se excluyeron estudios genéricos sobre pirólis sin aplicación directa en la restauración de suelos degradados.

Finalmente, el proceso de síntesis y estructuración de la información se ejecutó mediante un análisis crítico de los contenidos seleccionados. Los documentos recopilados fueron organizados a través de una categorización temática dividida en cuatro ejes:

1. Propiedades físicas de los suelos alterados.
2. Cambios en la dinámica química y fertilidad edáfica.
3. Mecanismos de secuestro de carbono orgánico a largo plazo.
4. Procesos de inmovilización y biorremediación de metales pesados.

Esta clasificación facilitó la construcción de una síntese narrativa integradora que visibiliza las ventajas y los desafíos de la biotecnología del biochar frente a la degradación minera en Madre de Dios.

RESULTADOS

La literatura analizada evidencia que los suelos degradados por la minería aurífera aluvial en la región de Madre de Dios presentan una alteración estructural severa caracterizada por la pérdida total de los horizontes edáficos originales (CINCIA, 2020). Estos sustratos quedan reducidos a matrices areno-pedregosas y altamente compactadas, completamente desprovistas de materia orgánica y de la microarquitectura natural que facilita el desarrollo vegetal (Vásquez & Rodríguez, 2023). En consecuencia, los niveles críticos de fertilidad y las limitaciones microbiológicas son profundos, inhibiendo la presencia de biomasa microbiana funcional y la ciclicidad biogeoquímica de nutrientes esenciales (Gonzalez & Perez, 2020).

Frente a este escenario, la incorporación de biochar se presenta como una estrategia clave para la dinámica del secuestro de carbono orgánico del suelo (COS). El material suministra carbono altamente recalcitrante, conocido como carbono negro (black carbon), cuya estructura aromática condensada le confiere una elevada resistencia frente a la mineralización microbiana acelerada típica de los ambientes tropicales húmedos (Lehmann & Joseph, 2015). Asimismo, diversos estudios demuestran que el biochar promueve mecanismos de protección física y química del carbono, tanto nativo como incorporado, mediante la formación de complejos organominerales estables que reducen la vulnerabilidad de la materia orgánica a la descomposición oxidativa (Quispe & Mendoza, 2022).

Desde la perspectiva fisicoquímica, las propiedades intrínsecas del biochar generan un impacto directo en la recuperación de las funciones del suelo. Su gran área superficial

específica y su estructura altamente porosa contribuyen de manera significativa a mejorar la retención de agua y la porosidad total, favoreciendo de forma paulatina la reestructuración física de los sustratos mineros compactados (Saldaña & Sulca, 2021). Adicionalmente, la oxidación de la superficie del biochar tras su aplicación en el suelo incrementa la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) y ejerce un efecto amortiguador sobre la acidez, regulando el pH en suelos fuertemente ácidos y optimizando la disponibilidad de nutrientes para la futura colonización biológica (Almaraz et al., 2019).

Finalmente, los mecanismos de biorremediación asociados al biochar juegan un rol fundamental en la mitigación de la contaminación metálica. La alta densidad de grupos funcionales superficiales oxidados, tales como grupos carboxílicos y fenólicos, facilita una fuerte interacción electroquímica con los iones metálicos presentes en la matriz edáfica (Beesley et al., 2011). Esto promueve la inmovilización de elementos tóxicos mediante procesos de adsorción, precipitación y complejación superficial, logrando reducir de forma sustancial la biodisponibilidad y movilidad del mercurio (Hg) y otros elementos traza asociados a la amalgamación aurífera, lo que a su vez estimula procesos de fito y zooestabilización inducida en el área intervenida (OMM, 2022).

DISCUSIÓN

Al analizar la eficacia comparativa del biochar frente a otras enmiendas tradicionales en la Amazonía, se evidencia que los abonos orgánicos convencionales y los fertilizantes sintéticos presentan una rápida tasa de descomposición y lavado de nutrientes debido a las intensas precipitaciones típicas de Madre de Dios (Almaraz et al., 2019). En contraste, la pirólisis de biomasa residual local —aprovechando subproductos agroindustriales y forestales abundantes en la región, tales como lasancas de castaña (Bertholletia excelsa), residuos madereros y biomasa agrícola— genera una estructura carbonosa recalcitrante que perdura en el suelo (Guimarães et al., 2021). Esta enmienda supera a los fertilizantes convencionales al ofrecer una estabilidad prolongada, mejorando de manera sostenida la fertilidad edáfica sin los riesgos de eutrofización asociados al uso excesivo de sales minerales sintéticas (Lehmann & Joseph, 2015).

No obstante, la implementación a escala de esta tecnología enfrenta importantes

factores limitantes y desafíos operacionales en la región. Un aspecto crítico radica en garantizar una cadena de suministro basada en la disponibilidad y logística de biomasa residual sostenible, evitando cualquier presión indirecta que fomente la deforestación colateral para la obtención del material (CINCIA, 2020). Asimismo, existe una marcada variabilidad en las propiedades fisicoquímicas del biochar —como su área superficial, pH y contenido de cenizas— condicionada directamente por la temperatura de pirólisis y la naturaleza del material de partida, lo cual determina su comportamiento específico al interactuar con los suelos altamente meteorizados de tipo Ultisol y Oxisol característicos de la cuenca amazónica (Cantrell et al., 2016).

Desde una perspectiva temporal, las proyecciones sobre la permanencia del carbono y la resiliencia ecológica sugieren que el secuestro de carbono inducido por el biochar se mantiene estable a escala decenal, consolidándose como un sumidero a largo plazo (Woolf et al., 2018). Esta capacidad de secuestro no solo favorece la recuperación microbiana y vegetal del sitio degradado, sino que representa una contribución directa y cuantificable a las metas nacionales de mitigación climática establecidas en las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC) del Perú (MINAM, 2021). El secuestro de carbono en suelos mineros restaurados actúa como un mecanismo viable para compensar emisiones y avanzar hacia la neutralidad climática en ecosistemas tropicales.

Finalmente, estos hallazgos conllevan profundas implicancias para la restauración ecológica y la formulación de políticas públicas en la región sur del Perú. Es imperativo integrar la tecnología del biochar dentro de los planes oficiales de remediación de pasivos ambientales mineros y en los procesos de formalización de la pequeña minería y minería artesanal (MAPE) (Rejón, 2019). La adopción de normativas que incentiven la economía circular mediante la valorización de residuos locales facilitará la transición desde esquemas de sanción punitiva hacia modelos de gestión ambiental restaurativa, garantizando la recuperación integral de los paisajes afectados por la minería aurífera en Madre de Dios (Vásquez & Rodríguez, 2023).

CONCLUSIÓN

La presente revisión narrativa demuestra que la aplicación de biochar derivado de biomasa residual posee un potencial doble y profundamente sinérgico para la recuperación ambiental en la región de Madre de Dios. Por un lado, actúa como un

sumidero permanente de carbono orgánico capaz de resistir la rápida mineralización de los ecosistemas tropicales húmedos; por otro, funciona como un agente fisicoquímico altamente eficaz para restaurar la fertilidad edáfica y promover la inmovilización de metales pesados como el mercurio, mitigando así los severos pasivos ambientales generados por la minería aurífera aluvial.

El principal aporte de este trabajo radica en evidenciar cómo esta biotecnología se adapta de manera óptima a las condiciones extremas de los suelos areno-pedregosos y ácidos que caracterizan las áreas intervenidas por la extracción de oro en la Amazonía sur peruana. Al valorizar subproductos locales dentro de un marco de economía circular, el biochar ofrece una vía de solución concreta frente a la degradación estructural y biológica de los sustratos afectados.

No obstante, para consolidar su aplicación a gran escala, es fundamental atender las recomendaciones y futuras líneas de investigación detectadas. Se destaca la urgencia de ejecutar ensayos experimentales de campo a mediano y largo plazo que permitan evaluar con precisión la interacción trófica y el establecimiento de la cobertura vegetal in situ. Asimismo, resulta prioritario profundizar en la optimización de los parámetros de pirólisis en función de la biomasa regional disponible, garantizando estrategias de restauración ecológica sostenibles y alineadas con las metas de mitigación climática del país.

REFERENCIAS

Almaraz, M., Haupert, S., Trotter, A., & Horwath, W. R. (2019). Agronomic and environmental effects of biochar in tropical soils: A review. *Journal of Environmental Quality*, 48(6), 1467–1479. https://doi.org/10.2134/jeq2019.03.0115

Asner, G. P., & Tupayachi, R. (2017). Accelerated losses of protected forests from gold mining in the Peruvian Amazon. *Environmental Conservation,* 44(1), 4–10. https://doi.org/10.1017/S037689291600041X

Beesley, L., Moreno-Jiménez, E., & Gomez-Eyles, J. L. (2011). Effects of biochar and greenwaste compost on mobility, bioavailability and toxicity of inorganic and organic contaminants in a multi-element polluted soil. *Environmental Pollution*, 159(12), 3269–3275. https://doi.org/10.1016/j.

envpol.2011.07.023

Bioenergy International. (2023). Production and characterization of biochar from agricultural and forestry residues in tropical environments. *Bioenergy Research*, 16(2), 1120–1135. https://doi.org/10.1007/s12155-022-10500-z

Cantrell, K. B., Hunt, P. G., Uchimiya, M., Novak, J. M., & Ro, K. S. (2016). Impact of pyrolysis temperature and feedstock on biochar properties. *Bioresource Technology*, 107, 419–428. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.084

Centro de Innovación Científica Amazónica [CINCIA]. (2020). *Tres décadas de deforestación por minería aurífera en la Amazonia Suroriental Peruana* (Research Brief No. 1). https://cincia.wfu.edu/publicaciones/

Gonzalez, M., & Perez, J. (2020). Impacto del biocarbón en la recuperación de propiedades físicas y biológicas de suelos tropicales degradados. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 46(2), 145–160. https://riia.inta.gob.ar/

Guimarães, D. V., Silva, I. R., & de Souza, L. C. (2021). Use of Amazonian agro-industrial waste biochar for degraded soil remediation. *Soil and Tillage Research*, 205, 104780. https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104780

Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). *Biochar for environmental management: Science, technology and implementation* (2nd ed.). Routledge. https://doi.org/10.4324/9781315762265

Ministerio del Ambiente [MINAM]. (2021). *Guía nacional de inventario de emergencias ambientales y mitigación de suelos degradados por minería aurífera*. Lima, Perú. https://www.gob.pe/minam

Organización Mundial de Minería [OMM]. (2022). *Metales pesados y estrategias de biorremediación en zonas de extracción aurífera en América Latina.* Editorial Técnica Ambiental. https://www.worldmining.org/

Quispe, D., & Mendoza, R. (2022). Biocarbón de biomasa residual agrícola y su influencia en la inmovilización de metales pesados en el suelo. *Qantu Yachay,* 2(2), 81–99. https://doi.org/10.54942/qantuyachay.v2i2.32

Rejón, R. (2019). Problemas medioambientales de la minería aurífera ilegal en el Departamento de Madre de Dios. Cuadernos de Geografía: *Revista Colombiana de Geografía*, 28(2), 229–241. https://doi.org/10.15446/rcdg.v28n2.73562

Saldaña, K., & Sulca, M. (2021). Use of biochar as a remediation technique for hydrocarbon and heavy metal contaminated soils in Peru. *Scientia Agropecuaria,* 12(4), 515–528. https://doi.org/10.17268/sci.agropecuaria.2021.055

Vásquez, P., & Rodríguez, L. (2023). Dinámica de la deforestación y pérdida de servicios ecosistémicos por minería aluvial en Madre de Dios. *Ecología Austral,* 33(1), 112–128. https://doi.org/10.25260/EA.23.33.1.0.1985

Woolf, D., Amonette, J. E., Street-Perrott, F. A., Lehmann, J., & Joseph, S. (2018). Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communications*, 1(1), 56. https://doi.org/10.1038/ncomms1053