



Biorremediación forestal en la encrucijada de la deuda ecológica: del mecanismo técnico a la cuestión de la justicia ambiental

Forest bioremediation at the crossroads of ecological debt: from technical mechanism to the question of environmental justice

Biorremediação florestal na encruzilhada da dívida ecológica: do mecanismo técnico à questão da justiça ambiental

Erika Valquiria Hurtado Escobar ^I

ehurtadoescobar@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-9178-2439>

Kenner Andrés Clevel Altafuya ^{II}

kenner.clevel.altafuya@utelvt.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0002-6535-9746>

Fernanda Justine Quinteros Cevallos ^{III}

fernanda.quinteros.cevallos@utelvt.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-6207-4417>

Rosa Clemencia Cruel Angulo ^{IV}

rosa.cruel@utelvt.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-8250-7419>

Correspondencia: ehurtadoescobar@gmail.com

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

* **Recibido:** 17 octubre de 2025 ***Aceptado:** 11 de noviembre de 2025 ***Publicado:** 09 de diciembre de 2025

- I. Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas, Ecuador.
- II. Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas, Ecuador.
- III. Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas, Ecuador.
- IV. Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas, Ecuador.

Resumen

Las soluciones técnicas y económicas, incluyendo la Biorremediación Forestal (BiFo) como una opción tecnológica y económica para la recuperación de Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH) en áreas impactadas por medidas extractivas, han sido recientemente reconocidas y perseguidas. Pero las prácticas latinoamericanas, en su aplicación, están moldeadas por formas históricas de injusticia ambiental, deuda ecológica y limitaciones exógenas que no solo condicionan su realización sino su valor político. En este artículo, se examinan en profundidad el alcance, las debilidades y las limitaciones de los enfoques biotecnológicos para los principios de fitorremediación, micorremediación y consorcios microbianos a la luz de los criterios para la restauración funcional del paisaje, la evaluación del riesgo residual y la degradación incompleta de contaminantes. Desde una perspectiva de Ecología Política, se explora cómo BiFo puede ser empleado como una herramienta de verdadera reparación, o podría ser cooptado para ganar legitimidad para la supervivencia del extractivismo. En este sentido, se desarrolla una estructura que especifica y distingue criterios en términos de transparencia, comunidad, responsabilidad histórica y técnica, lo cual es crucial para diferenciar entre procesos de remediación genuinos y cosméticos. En última instancia, se argumenta la necesidad del desarrollo de modelos de ciencia post-normal, enfoques de justicia espacial y mecanismos de financiamiento climático justo que desvinculen la reconstrucción ambiental de la dependencia extractiva. BiFo solo puede ser una herramienta para trabajar por la justicia ecológica si es efectiva para la restauración ecológica funcional y el empoderamiento de las comunidades afectadas.

Palabras clave: Biorremediación forestal; justicia ambiental; deuda ecológica; lavado verde; restauración ecológica.

Abstract

Technical and economic solutions, including Forest Bioremediation (BiFo) as a technological and economic option for the recovery of Total Petroleum Hydrocarbons (TPH) in areas impacted by extractive activities, have recently been recognized and pursued. However, Latin American practices, in their application, are shaped by historical forms of environmental injustice, ecological debt, and exogenous limitations that condition not only their implementation but also their political value. This article examines in depth the scope, weaknesses, and limitations of biotechnological

approaches to the principles of phytoremediation, mycoremediation, and microbial consortia in light of criteria for functional landscape restoration, residual risk assessment, and incomplete contaminant degradation. From a Political Ecology perspective, it explores how BiFo can be employed as a tool for genuine remediation or how it could be co-opted to legitimize the survival of extractivism. In this sense, a structure is developed that specifies and distinguishes criteria in terms of transparency, community, and historical and technical responsibility, which is crucial for differentiating between genuine and cosmetic remediation processes. Ultimately, the need for the development of post-normal science models, spatial justice approaches, and fair climate finance mechanisms that decouple environmental reconstruction from extractive dependency is argued. BiFo can only be a tool for working towards ecological justice if it is effective for functional ecological restoration and the empowerment of affected communities.

Keywords: Forest bioremediation; environmental justice; ecological debt; greenwashing; ecological restoration.

Resumo

Soluções técnicas e econômicas, incluindo a Biorremediação Florestal (BRF) como opção tecnológica e econômica para a recuperação de Hidrocarbonetos Totais de Petróleo (HTP) em áreas impactadas por atividades extrativas, têm sido reconhecidas e implementadas recentemente. No entanto, as práticas latino-americanas, em sua aplicação, são moldadas por formas históricas de injustiça ambiental, dívida ecológica e limitações exógenas que condicionam não apenas sua implementação, mas também seu valor político. Este artigo examina em profundidade o alcance, as fragilidades e as limitações das abordagens biotecnológicas aos princípios da fitorremediação, micorremediação e consórcios microbianos, à luz de critérios para restauração funcional da paisagem, avaliação de risco residual e degradação incompleta de contaminantes. De uma perspectiva de Ecologia Política, explora como a BRF pode ser empregada como ferramenta para remediação genuína ou como poderia ser cooptada para legitimar a sobrevivência do extrativismo. Nesse sentido, desenvolve-se uma estrutura que especifica e distingue critérios em termos de transparência, comunidade e responsabilidade histórica e técnica, o que é crucial para diferenciar entre processos de remediação genuínos e superficiais. Por fim, argumenta-se a necessidade do desenvolvimento de modelos científicos pós-normais, abordagens de justiça espacial e mecanismos justos de financiamento climático que desvinculem a reconstrução ambiental da dependência

extrativista. A Biorremediação Florestal (BiFo) só pode ser uma ferramenta para a justiça ecológica se for eficaz para a restauração ecológica funcional e o empoderamento das comunidades afetadas.

Palavras-chave: Biorremediação florestal; justiça ambiental; dívida ecológica; greenwashing; restauração ecológica.

Introducción

La contaminación que ocurre en gran parte de América Latina, en particular con respecto a la liberación de Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH), no sigue una serie de casos aislados, sino que es la expresión de la lógica estructural del modelo de extractivismo primario exportador dominante en América Latina en el pasado. Estas economías están fundamentalmente basadas en la extracción de recursos y la producción para exportar materias primas, con el objetivo de crear divisas necesarias para enfrentar restricciones externas y lidiar con déficits comerciales de larga data (Pantilimon, 2023; Vercellone & Cardoso, 2017). En este contexto, los derrames de petróleo y la aplicación negligente de aguas tóxicas de pozos petroleros se convierten en pasivos socioambientales sistémicos que rara vez se entienden o remedian. Estos pasivos son una deuda histórica que recae más fuertemente en las comunidades locales, especialmente indígenas y campesinas, pero cuya infraestructura sociopolítica genera las externalidades negativas asociadas con el desarrollo, ya sea nacional o global (Osborne et al., 2021; Quispe-Jofré et al., 2021). Ante estas realidades, surge una respuesta política y social a la distribución inequitativa de riesgos y beneficios, que se ha denominado justicia ambiental, que exige una reestructuración muy necesaria de los sistemas socioespaciales que gobiernan quién recibe el golpe (por ejemplo, Gifford & Sauls, 2024; Pali et al., 2022). Así, la remediación ambiental se convierte en una tarea que va más allá de lo técnico. Para los estados dependientes del petróleo, la contaminación no solo es un peligro ecológico, sino también un peligro económico y legal: la interrupción puede paralizar la actividad productiva, exacerbar el conflicto social y generar incertidumbre sobre las inversiones. Como tal, tecnologías como la Biorremediación Forestal (BiFo) se despliegan frecuentemente no solo como instrumentos ecológicos sino como herramientas operativas en la búsqueda de preservar el flujo continuo de ingresos petroleros y la base económica del estado (Bawuah, 2024; Choudhary et al., 2025). Pero la evaluación de BiFo no se limita a su capacidad para reducir los niveles de TPH en el suelo. Su efectividad también necesita ser examinada de manera holística al considerar la recuperación funcional de la función del ecosistema, la evitación de riesgos toxicológicos

residuales y, lo más importante, la oportunidad de avanzar hacia la recuperación de la deuda ecológica que creció a partir de décadas de extractivismo (Cortés et al., 2025; Malakar et al., 2023). Desde el punto de vista de la Ecología Política, esto significa tratar de determinar si BiFo es un acto genuino de responsabilidad ambiental, siendo una tecnología de legitimación extractiva que funciona como un medio de legitimidad a través del lavado verde corporativo (Fitzpatrick, 2024; Ali et al., 2024).

El objetivo de este ensayo es examinar y evaluar de manera multidimensional la Biorremediación Forestal para la restauración ambiental en entornos petroleros latinoamericanos, examinando su eficacia ecológica, los conflictos ambientales-distributivos y su potencial para la promoción de la justicia ambiental y el poder de remediación para áreas devastadas.

Desarrollo

Aspectos esenciales de la biorremediación forestal (BiFo): Posibilidades y limitaciones técnicas

La biorremediación (BiFo) combina procesos bioanalíticos, basados en la degradación de subproductos de plantas, hongos y microbios para degradar contaminantes peligrosos en especies menos tóxicas o más biológicamente descomponibles. Como una alternativa ecológica de bajo costo y altamente adaptable, esta tecnología se está utilizando para distribuir los costos de largos tiempos de recuperación e incertidumbre biológica incrustada dentro de los sistemas vivos en el sector ambiental (Osborne et al., 2021; Cortés et al., 2025). Mecanismos biológicos de degradación de hidrocarburos totales de petróleo (TPH).

Fitorremediación: la interfaz entre plantas y microbios

La fitorremediación utiliza especies de árboles, arbustos o plantas herbáceas para estabilizar, transformar o extraer contaminantes en el suelo. Basado en el entorno de TPH como base, la rizodegradación es la vía predominante de degradación de TPH, y los microorganismos que viven en la rizosfera mejoran notablemente la actividad metabólica de la rizosfera cuando interactúan con exudados de raíces (Malakar et al., 2023).

Este enfoque funciona en áreas extensas con un nivel de contaminación bajo a moderado y en productos químicos de baja dinámica, pero es lento debido al ciclo biológico de las plantas. Por ejemplo, está bien demostrado que especies nativas en ecosistemas tropicales como *Piptocoma discolor*, *Theobroma cacao*, *Jacaranda copaia*, *Cedrela sp.*, *Schizolobium parahyba* bioacumulan

derivados del petróleo y sus tejidos poseen diferentes niveles de acumulación de contaminantes (Chan-Quijano et al., 2025).

Mientras que *Piptocoma discolor* es una de estas especies que muestra altas concentraciones en las hojas, la evidencia comparativa de su superioridad como fitorremediadores es escasa, y los datos sobre su eficiencia estadística y estabilidad ecológica necesitan ser analizados más a fondo. Desde un punto de vista biotecnológico, la relación entre plantas y microorganismos rizosféricos, así como las actividades de las enzimas de degradación y los procesos de quelación en la transformación de hidrocarburos, siempre han sido considerados de importancia (Choudhary et al., 2025).

Micorremediación: actividad de hongos en enzimas

La micorremediación utiliza hongos que son capaces de degradar compuestos recalcitrantes, en particular hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs), mediante enzimas extracelulares que dividen moléculas complejas en cadenas más simples y seguras (Malakar et al., 2023).

Este método es notable por su viabilidad económica: basado en estimaciones de costos para suelos tratados, es significativamente más bajo que las tecnologías físicas y químicas tradicionales y uno de los sustitutos más baratos para territorios tratados extractivamente (Bawuah, 2024).

Sin embargo, este bajo costo tiene un significado político y ético. Dado que estas son actividades a largo plazo, las empresas pueden reducir la inversión inicial, ya que también distribuyen el compromiso de tiempo, alta exposición al mismo tiempo a cualquier contaminante residual y cuestionan sobre el subproducto en degradación a las comunidades (Gifford & Sauls, 2024; Osborne et al., 2021).

Comunidad microbiana: la optimización biomédica

La biotecnología contemporánea es el uso de consorcios microbianos que incluyen *Pseudomonas* sp., *Rhizobium* sp., y hongos nativos (para mejorar la descomposición cooperativa de hidrocarburos en un entorno con diversos contaminantes en un ecosistema biotecnológico actual). Esta estrategia de múltiples especies permite un rango de detección más amplio de contaminantes transformados y la optimización de las condiciones metabólicas para la remediación (Ali et al., 2024).

Los consorcios han tenido éxito en la degradación de lodos contaminados y grasa de aceite mediante modelos de investigación microbiológica y cinética, que han demostrado su tolerancia a sustratos pobres en nutrientes así como a condiciones extremas (Choudhary et al., 2025). Su diseño

es para hacer bioinoculantes particulares para el tratamiento de suelos contaminados con petróleo en ambientes tropicales.

El riesgo de subestimar la toxicidad química y el costo de tiempo de la bioacumulación

Aunque la fragmentación molecular realizada por hongos mitiga la contaminación de hidrocarburos pesados, la degradación deficiente puede generar intermediarios que pueden ser más móviles o reactivos y que tendrían un efecto adverso a corto plazo en la cadena alimentaria y el agua (Cortés et al., 2025).

Este riesgo es particularmente pertinente cuando los sistemas de vigilancia ambiental solo cubren reducciones globales de TPH y no monitorean los subproductos desde el principio y durante el proceso. La justicia ambiental es otro tema, ya que la ausencia de un monitoreo estricto exacerba las desigualdades, ya que quienes viven con metabolitos residuales no son quienes obtienen las recompensas de la extracción de petróleo (Osborne et al., 2021; Pali et al., 2022).

Restauración Ambiental y Evaluación de Riesgos Ambientales

La Biorremediación Forestal (BiFo) debe situarse con respecto a los objetivos de la Ingeniería Forestal y la Evaluación de Riesgos Ambientales para dejar claro que esta intervención no solo reduce químicamente los niveles de contaminación, sino que también restaura la funcionalidad ecológica del paisaje. Así, desde una visión global y de manera integral, la remediación debe concebirse como una etapa inicial en un proceso de restauración de ecosistemas (Osborne et al., 2021; Cortés et al., 2025).

Ingeniería Forestal y Restablecimiento Funcional en la Post-Remediación

El punto de vista forestal señala que un sitio está "limpio" bajo un límite permisible impuesto por los Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH) desde su estado normal, incluso si funcionalmente no ha alcanzado un punto de re-funcionalidad; esto solo debería ocurrir cuando se alcanza la restauración funcional. Deben restaurarse propiedades esenciales del ecosistema como la resiliencia, la estructura trófica y los ciclos biogeoquímicos que son necesarios para la restauración ecológica (Pali et al., 2022).

Para avanzar hacia la restauración funcional en la ingeniería forestal, es necesario establecer zonas de amortiguamiento que utilicen vegetación para ralentizar la escorrentía del agua y mejorar la infiltración que promueve la estabilización del suelo y atrapa contaminantes superficiales y subterráneos (Choudhary et al., 2025).

Además, la gestión post-remediación debe dar prioridad a la regeneración natural asistida, particularmente en un ecosistema degradado, en el cual se despliegan especies nativas que han tenido capacidad de bioacumulación o son tolerantes a contaminantes derivados del petróleo (Chan-Quijano et al., 2025).

BiFo que utiliza especies de rápido crecimiento o exóticas para impulsar la reducción de TPH resulta en un paisaje empobrecido que carece de complejidad estructural para preservar la biodiversidad o la resiliencia ante futuras perturbaciones. Por lo tanto, es esencial conceptualizar BiFo como un punto de partida, no un punto final, en el proceso de recuperación del ecosistema (Osborne et al., 2021).

Evaluación de Riesgos y Toxicidad Residual; Persistencia del Contaminante

La evaluación ambiental no debe descansar en el cumplimiento de los límites regulatorios; debe basarse en estándares para apoyar la salud del ecosistema, estándares que a menudo son más estrictos que un nivel legal mínimo (Gifford & Sauls, 2024).

La movilidad del contaminante es importante: trabajos recientes han demostrado que algunos aditivos como los utilizados en combustibles modernos, incluso en el contexto de la transición energética "verde", pueden aumentar la movilidad subterránea de los contaminantes, complicando su contención y disminuyendo los beneficios de los métodos de biorremediación *in situ* (Malakar et al., 2023).

Según esta paradoja ecológica, el uso de combustibles alternativos o biocombustibles no siempre mitiga el impacto ambiental, pero en algunos escenarios puede acelerar la difusión de los contaminantes.

Esto implica que la evaluación de riesgos necesita identificar la necesidad de una remediación inmediata considerando tanto la naturaleza móvil del contaminante como la persistencia de los metabolitos producidos durante la degradación biológica. Además, el uso de comunidades microbianas biorremediadoras, como *Burkholderia* sp. o *Rhizobium* sp., debe interpretarse con cautela. Si bien su presencia puede asociarse con actividad degradativa, también puede demostrar un riesgo crónico si los contaminantes residuales o sus metabolitos permanecen en concentraciones ecológicamente significativas (Ali et al., 2024; Cortés et al., 2025).

La Deuda Social, Económica y Ambiental del Sector Extractivo: Un Análisis Político-Empírico

La naturaleza de BiFo no puede separarse de las condiciones económicas y políticas que dieron lugar a la contaminación. La deuda externa, el extractivismo y la restricción externa forman los marcos estructurales a través de los cuales definimos el significado profundo de la remediación y la justicia ambiental (Pantilimon, 2023; Vercellone & Cardoso, 2017).

Extractivismo, Deuda Externa y Restricción Externa: una serie de problemas que afectan al Amazonas

El régimen de deuda y el extractivismo como extracción de divisas están estrechamente vinculados a la crisis climática en el Sur Global. Este "círculo vicioso" ejerce gran presión sobre los territorios amazónicos, donde la explotación petrolera y minera continúa floreciendo para financiar compromisos externos, sacrificando la protección ambiental (Pantilimon, 2023).

En Ecuador, la necesidad urgente de ingresos fiscales para pagar deudas externas ha resultado en políticas que enfatizan la extracción de materias primas en lugar de la protección del medio ambiente. La restricción externa, es decir, la incapacidad del Estado para mantener superávits económicos en economías dependientes, lo obliga a estimular las exportaciones de petróleo y minerales para preservar reservas internacionales mínimas (Vercellone & Cardoso, 2017).

En este contexto, BiFo es visto por los empresarios como un costo operativo integral a la actividad extractiva. Sin embargo, el costo real de la remediación es el costo de oportunidad de no tener un modelo económico soberano que pueda financiar la transición ecológica sin mayor dependencia del extractivismo. Con financiamiento climático público e incondicional disponible para los estados amazónicos, la necesidad de expandir la frontera extractiva estará bajo mucha menos presión (Gifford & Sauls, 2024).

El Metabolismo Social como Fundamento de la Estructura de Deuda Ecológica

El modelo de desarrollo latinoamericano ha sostenido el metabolismo social los flujos de energía y materiales para apoyar las economías nacionales y ha impulsado su continuo aumento. La extracción y exportación a gran escala de grandes cantidades de productos primarios crean un "déficit físico", donde una medida significativa y medible de la deuda ecológica acumulada en la presente crisis ambiental se evidencia por la retirada de cantidades mayores que las que están ingresando (Pantilimon, 2023; Vercellone & Cardoso, 2017).

Esta escasez de recursos toma la forma de degradación material, específicamente a través del agotamiento de recursos naturales. En Ecuador, la contaminación petrolera y el desarrollo de la frontera extractiva juegan un papel en una pérdida a largo plazo de biodiversidad y cobertura vegetal, y esto se evidencia por las altas tasas de deforestación en muchas provincias amazónicas (Osborne et al., 2021; Cortés et al., 2025).

Políticamente, estas responsabilidades socioambientales epitomizan los costos que la industria extractiva continúa externalizando a través de comunidades rurales e indígenas. Este contexto genera una profunda tensión ética: los proyectos de reparación ambiental, incluida la Biorremediación Forestal (BiFo), se pagan con ingresos de los procesos de producción extractiva que crearon la destrucción. Políticamente, esto reproduce una lógica en la que la destrucción es una condición necesaria para la limpieza, y que legitima el extractivismo a través de un discurso de gestión ambiental tecnificada (Gifford & Sauls, 2024).

El desequilibrio de la justicia ecológico-distributiva

La justicia ambiental es un movimiento social y político que denuncia la distribución desigual de los beneficios y perjuicios derivados del desarrollo económico. Esta perspectiva reconoce que los grupos indígenas, campesinos y otros grupos indigentes soportan desproporcionadamente las consecuencias de las actividades extractivas (Pali et al., 2022; Osborne et al., 2021).

Gran parte del conflicto socioambiental en América Latina consiste en poblaciones indígenas defendiendo su tierra o territorio contra proyectos de petróleo, minería e infraestructura (Quispe-Jofré et al., 2021).

BiFo puede, desde la perspectiva de estas comunidades, parecer inadecuado a menos que esté disponible un sistema de reparación transformadora, que reconozca explícitamente la deuda histórica y los derechos colectivos. En los campos amazónicos, las organizaciones locales y regionales de conservación lideradas por personas indígenas están bajo constante amenaza por la extracción de petróleo, lo que complica el establecimiento de una restauración a largo plazo (Cortés et al., 2025).

Un BiFo ético debería, por lo tanto, servir en la restauración no solo del ecosistema y la desmovilización de actividades contaminantes, sino en la restauración de los derechos territoriales, en lugar de ser un mecanismo de legitimación extractiva.

Responsabilidad ambiental genuina vs. lavado de imagen corporativo

La efectividad técnica de BiFo puede ser cooptada por empresas extractivas como una herramienta de lavado de imagen verde: una cobertura ambiental destinada a oscurecer el impacto estructural, manipular la opinión pública y cumplir superficialmente con sus requisitos de responsabilidad social (Fitzpatrick, 2024; Gifford & Sauls, 2024).

El discurso de cumplimiento y opacidad en proyectos de remediación

En la industria extractiva, el lavado de imagen verde se lleva a cabo frecuentemente a través de la opacidad en la información, la selección selectiva de los indicadores y la adhesión a estándares bajos. El problema principal, sin embargo, es que una empresa puede cumplir con los límites legales de TPH, sin considerar todo el conjunto de impactos que surgen de sus actividades de ciclo de vida completo (Bawuah, 2024; Cortés et al., 2025).

Varios análisis críticos notan que las divulgaciones corporativas no contienen métricas comparables e información clara sobre la gestión del agua y las emisiones, lo que reduce la transparencia y hace imposible evaluar los impactos potenciales directamente (Lu & Yue, 2022). Tales brechas no pueden ser remediadas de manera aislada y superficial con esquemas de remediación en industrias contaminantes, por ejemplo, una empresa petrolera (Chan-Quijano et al., 2025).

Mecanismos específicos de lavado de imagen verde en la Biorremediación Forestal

- Desplazamiento de la carga moral. La naturaleza biológica de BiFo permite a las empresas argumentar que "la naturaleza se recupera por sí misma" y que es obligación de los organismos naturales recuperarse, reduciendo así el sentido de culpa del público (Pali et al., 2022).
- Enfoque restrictivo en métricas. El énfasis exclusivo en la reducción de TPH excluye la persistencia de metabolitos tóxicos o riesgos acumulativos para las comunidades y los ecosistemas, alimentando así narrativas engañosas al público en general sobre el cumplimiento ambiental (Cortés et al., 2025).
- Remediación superficial e incompleta. Las organizaciones de justicia comunitaria y ambiental también han observado situaciones donde la contaminación pasada no se maneja con respeto; los proyectos de BiFo están allí para intervenir en sitios específicos, sin abordar los daños totales infligidos por el daño ambiental acumulado (Osborne et al., 2021).

- Laxitud regulatoria y ausencia de sanciones claras. Las empresas pueden hacer afirmaciones ambientales engañosas en muchos países de América Latina cuando no existen estándares regulatorios firmes para prevenir el lavado de imagen verde, donde solo después de quejas sociales o sanciones regulatorias se eliminan las prácticas (Gifford & Sauls, 2024).

Criterios diferenciadores: responsabilidad genuina vs. lavado de imagen verde

Desde la Ecología Política, la diferencia entre la reparación técnica y la transformación ética requiere el examen del alcance, la transparencia, la participación comunitaria y el reconocimiento de la deuda histórica. Tales criterios hacen posible entender cuándo la Biorremediación Forestal (BiFo) se configura como un acto de justicia ambiental o una estrategia de legitimación extractiva (lavado de imagen verde) cuando ocurre (Fitzpatrick, 2024; Gifford & Sauls, 2024).

Tabla 1. Criterios diferenciadores: Responsabilidad Genuina vs. Greenwashing

Dimensión	Reparación Genuina (Justicia Ambiental)	Greenwashing (Maquillaje de Impactos)	Fuente
Alcance Técnico	Remediaciación basada en criterios de riesgo ecológico funcional; restauración de biodiversidad y resiliencia del paisaje.	Cumplimiento legal mínimo centrado solo en reducción de HTP (ppm).	Cortés et al., 2025
Transparencia / Métricas	Divulgación explícita de emisiones, riesgos residuales, impactos hídricos y de suelo.	Informes breves, vagos y no comparables; uso de lenguaje “eco-amigable” sin respaldo técnico.	Lu & Yue, 2022
Participación	Diseño y monitoreo co-gestionado con comunidades; validación mediante conocimiento local.	Información unidireccional posterior al diseño; exclusión del conocimiento popular.	Pali et al., 2022

Responsabilidad Histórica	Compensación integral del daño pasado; inversión en alternativas económicas post-extractivas.	Intervención limitada al incidente actual; remediación usada como licencia social para expansión futura.	Osborne et al., 2021
---------------------------	---	--	----------------------

Valoración y Justicia Cultural en los Idiomas

Un aspecto clave de evaluar una verdadera reparación es ser inclusivo con los idiomas de valoración comunitaria (Pali et al., 2022). Es el fracaso de la intervención lo que está reduciendo HTP, pero no resulta en un aumento de la pesca, la recolección o el uso cultural para las comunidades que ven su tierra como un centro medicinal, alimenticio o espiritual, hasta el punto de que es un fracaso de la justicia ambiental.

El Papel del Conocimiento Científico en los Procesos de Justicia Ambiental

Es en los conflictos ecológico-distributivos donde la ciencia hace más que crear datos: también redistribuye el poder. La importancia del conocimiento científico como catalizador político que puede desafiar los discursos oficiales y proteger los territorios del extractivismo (Gifford & Sauls, 2024).

La Ciencia como Contrapoder Técnico y Estratégico

Frente a Estados que a menudo actúan como intermediarios entre empresas y comunidades (Pali et al., 2022), la ciencia comprometida puede ofrecer un apoyo técnico, legal y cartográfico esencial. El Atlas EJOLT u otros observatorios de conflictos socioambientales mapean sistemáticamente las injusticias territoriales (Osborne et al., 2021).

Pero esta mediación crea tensiones: la validación técnica de la academia se convierte en un arma de doble filo y, lo que es importante, tiende a socavar la legitimidad del conocimiento indígena o campesino una categoría referida por los académicos como ambientalismo de los pobres cuya experiencia directa es lo que genera quejas (Pali et al., 2022). La dificultad es definir no uno, sino ambas formas de conocimiento y que una no sobrepase a la otra.

Interdisciplinariedad y Ciencia Post-Normal

Los conflictos ambientales son de alto riesgo con alta incertidumbre; por lo tanto, se requieren enfoques de ciencia post-normal, en los que la comunidad se integra en una "comunidad de pares extendida" (Pali et al., 2022).

Casos de ejemplo como la epidemiología popular que surgió de organizaciones comunitarias demuestran cómo el conocimiento local puede proporcionar evidencia sólida, que contradice las narrativas oficiales, particularmente en contextos de control de la información por parte de la industria (Cortés et al., 2025).

Justicia Espacial como Marco Metodológico para la Reparación

La justicia espacial examina si la remediación cambia la relación socio-espacial que gobierna la difusión de daños y beneficios (Gifford & Sauls, 2024).

El científico dedicado debe evaluar no solo la disminución de HTP, sino también:

- Quién decide,
- Quién puede controlar,
- Quién se beneficia,
- Quién queda vulnerable.

BiFo solo es socialmente justo en términos espaciales si beneficia a la comunidad y minimiza la extracción. Si no, sin embargo, existe la posibilidad de captura tecnológica: que la industria cite la efectividad de BiFo como argumento para excusar nuevas contaminaciones y tratarlo como una licencia barata para contaminar, lo cual va en contra de cualquier ideología de sostenibilidad real (Fitzpatrick, 2024).

Conclusiones

La Biorremediación Forestal usando fitorremediación, micorremediación y consorcios microbianos ofrece una técnica prometedora para mejorar la degradación de HTP al trabajar con suelos altamente contaminados (Cortés et al., 2025; Choudhary et al., 2025). En el entorno latinoamericano, su aplicación, sin embargo, está enmarcada en un contexto caracterizado por deuda ecológica, extractivismo y restricción externa. BiFo hace que el costo temporal y la incertidumbre biológica sean responsabilidad de las comunidades, mientras permite que el petróleo continúe con sus actividades petroleras necesarias para cubrir el gasto estatal. Si BiFo no debe ser instrumentalizado como lavado verde, no puede limitarse a un mero cumplimiento regulatorio en el mejor de los casos:

- Restauración ecológica funcional,
- Reparación histórica,

- Asegurando que los derechos colectivos estén protegidos,
- Una reducción sistémica e inclusiva de las desigualdades ambientales.

Sugerencias Estratégicas y de Política

Los mecanismos de financiamiento climático deben ser justos e incondicionales, lo que aliviaría la presión para ampliar la esfera de extracción en los países. Los esfuerzos de remediación deben abordar el riesgo restante, el movimiento de contaminantes y la toxicidad de los metabolitos por encima de las leyes. Los marcos regulatorios en la escena internacional deben hacer de la transparencia total un requisito, mientras sancionan simultáneamente las afirmaciones ambientales engañosas. Implementar programas de investigación-acción participativa que combinen el conocimiento técnico con la sabiduría indígena y comunitaria.

Referencias

1. Ali, E.B., Agbozo, E., Aboagye, E.M. et al. Investigating the research trends on the determinants of Environmental degradation: A bibliometric analysis. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 21, 7775–7796 (2024). <https://doi.org/10.1007/s13762-024-05521-y>
2. Bawuah, M. C. (2024). Environmental Impacts of Oil and Gas Well Plugging and Abandonment: Best Practices and Future Directions. *SAMRIDDHI : A Journal of Physical Sciences, Engineering and Technology*, 16(04), 164-173. <https://doi.org/10.18090/samriddhi.v16i04.06>
3. Bostancı, S.H. (2023). The Role of Local Governments in Encouraging Participation in Reforestation Activities. In: Singh, P., Milshina, Y., Batalhão, A., Sharma, S., Hanafiah, M.M. (eds) *The Route Towards Global Sustainability*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-10437-4_2
4. Chan-Quijano, J. G., Castro-Salazar, J. I., & Carpio-Domínguez, J. L. (2025). *Contaminated Soils in Mexico: A Green Criminological Approach*. Springer Nature.
5. Charfi, K. (2025). Corporate Environmental Liabilities' Impact on Companies' Stock Returns (Master's thesis, Universidade NOVA de Lisboa (Portugal)).
6. Choudhary, V.K., Mazumdar-Leighton, S., Babu, C.R. (2025). Ecological Restoration of Mined-Out Areas for Achieving Land Degradation Neutrality: Opportunities and Challenges. In: Mittal, D., Gupta, D.K. (eds) *Ecological Restoration in India: Perspective and Practices*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-96-8943-9_4

7. Cortés, S., González, P., Leiva, C., Vargas, Y., Vega, A., & Pastén, P. (2025). Environmental and Public Health Impacts of Mining Tailings in Chañaral, Chile: A Narrative Case-Based Review. *Sustainability*, 17(17), 7732. <https://doi.org/10.3390/su17177732>
8. Dzerefos, C. M., & Matlou, T. (2025). "The buck stops here": State and community hold a clay mine accountable for environmental harm in South Africa. *The Extractive Industries and Society*, 24, 101722.
9. Fitzpatrick, N. (2024). Translating Degrowth: From Policy Proposals to Praxis. In De Gruyter Handbook for Degrowth (pp. 129-148). Walter de Gruyter GmbH. <https://doi.org/10.1515/9783110778359-011>
10. Gifford, L. and Sauls, L.A. (2024), Defining Climate Finance Justice: Critical Geographies of Justice Amid Financialized Climate Action. *Geography Compass*, 18: e70008. <https://doi.org/10.1111/gec3.70008>
11. Lu, B., & Yue, S. (2022). A Study on the Mechanism of Environmental Information Disclosure Oriented to the Construction of Ecological Civilization in China. *Sustainability*, 14(10), 6378. <https://doi.org/10.3390/su14106378>
12. Malakar, K.D., Kumar, M., Anand, S., Kuzur, G. (2023). Climate Crisis and Socio-Ecological Sustainability. In: Climate Change and Socio-Ecological Transformation. Advances in Geographical and Environmental Sciences. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-4390-6_9
13. Osborne, T., Brock, S., Chazdon, R., Chomba, S., Garen, E., Gutierrez, V., ... & Sundberg, J. (2021). The political ecology playbook for ecosystem restoration: Principles for effective, equitable, and transformative landscapes. *Global Environmental Change*, 70, 102320.
14. Pali, B., Forsyth, M., & Tepper, F. (Eds.). (2022). The Palgrave handbook of environmental restorative justice. London: Palgrave Macmillan.
15. Pantilimon, I. (2023). 'Nuestro Green New Deal': the Ecosocial Pact of the South and the emergence of biocentric green transitions. *Third World Quarterly*, 44(8), 1901–1918. <https://doi.org/10.1080/01436597.2023.2213204>
16. Quispe-Jofré, A., Philimon, P.P. & Alfaro-Lira, S. Socio-environmental conflict over abandoned mining waste in Copaquilla, Chile. *Environ Sci Pollut Res* 28, 68773–68791 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15385-1>

17. Vercellone, C., and Cardoso, P. (2017). Nueva división internacional del trabajo, capitalismo cognitivo y desarrollo en América Latina. *Chasqui. Revista Latinoamericana de Comunicación* 2017, 37. doi: 10.16921/chasqui.v0i133.2941

© 2025 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).