

Alternativas para la biorremediación de suelos contaminados con glifosato en el departamento de Nariño, Colombia

Alternatives for the Bioremediation of Glyphosate-contaminated Soils in the Department of Nariño, Colombia

Mónica Alejandra Rodríguez Aristizábal^{ac} Laura Alejandra Mejía Barreto^{bd}

^a Bacterióloga, Msc. Ciencias Ambientales. Msc. Microbiología, docente tiempo completo de la Universidad Central, Colombia

^b Bacterióloga y laboratorista clínico, énfasis en microbiología ambiental. Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca, Colombia

^c mrodrigueza12@ucentral.edu.co | <https://orcid.org/0000-0003-0455-3297>

^d lalejandrimejia@unicolmayor.edu.co | <https://orcid.org/0009-0009-1307-0984>

Citacion: Rodríguez Aristizábal, M. A., Mejía Barreto, L. A. (2025). Alternativas para la biorremediación de suelos contaminados con glifosato en el departamento de Nariño, Colombia. *Mutis* 15(2). 1- 20.
<https://doi.org/10.21789/22561498.2172>

Recibido: 26 de junio de 2025
Aceptado: 15 de agosto de 2025

Copyright: © 2025 por los autores. Licenciado para *Mutis*. Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Attribution (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

RESUMEN

El glifosato es un herbicida de amplio uso en Colombia, aplicado tanto en agricultura como en programas de erradicación de cultivos ilícitos. Su uso intensivo en el departamento de Nariño ha generado efectos adversos sobre las propiedades fisicoquímicas y biológicas del suelo, considerándose un contaminante recalcitrante. A partir de esta problemática surge la pregunta: ¿qué alternativas de biorremediación podrían contribuir a la recuperación de los suelos contaminados con glifosato en Nariño? El objetivo de este trabajo fue revisar las estrategias microbianas y vegetales de biorremediación aplicables al contexto socioecológico del departamento. Para ello, se realizó una revisión bibliográfica sistemática de artículos originales, experimentales, de revisión y documentos técnicos publicados entre 2013 y 2024, utilizando bases de datos nacionales e internacionales. Se seleccionaron 52 publicaciones pertinentes, que fueron analizadas mediante un enfoque cualitativo y estadística descriptiva. Los resultados evidenciaron que diversos microorganismos, entre ellos *Bacillus spp.*, *Pseudomonas spp.*, *Achromobacter spp.* y *Flavobacterium spp.*, presentan mecanismos metabólicos eficaces para degradar glifosato. Adicionalmente, se identificaron plantas como *Vulpia myuros* y *Amaranthus tricolor* con potencial para remover este herbicida del suelo, así como estrategias complementarias, entre ellas la vermicoremediación. En el caso particular de Nariño, la diversidad de suelos demanda estrategias diferenciadas de bioaumentación y bioestimulación para optimizar la recuperación de cada orden de suelo. Se concluye que la biorremediación basada en microorganismos y plantas representa una alternativa sostenible y prometedora para mitigar la contaminación por glifosato en Nariño. Sin embargo, se requiere establecer una línea base sobre concentraciones del herbicida en los diferentes tipos de suelo y un plan de manejo adaptado a las condiciones socioecológicas y productivas de la región.

Palabras clave: contaminación por plaguicidas; degradación microbiana; restauración ambiental; suelos agrícolas; estrategias sostenibles; ciencias naturales.

ABSTRACT

Glyphosate is one of the most widely used herbicides in Colombia, applied both in agriculture and in illicit crop eradication programs. Its intensive use in the department of Nariño has adversely affected the physicochemical and biological properties of soils, leading it to be classified as a recalcitrant contaminant. This issue

raises a central question: what bioremediation alternatives could support the recovery of glyphosate-contaminated soils in Nariño? The objective of this study was to review microbial and plant bioremediation approaches that are applicable to the socioecological context of the department. To this end, a systematic literature review was conducted of original research, experimental studies, reviews, and technical reports published between 2013 and 2024 was conducted in both national and international databases. Fifty-two relevant publications were selected and analyzed using a qualitative approach combined with descriptive statistics. The findings indicate that several microorganisms—including *Bacillus* spp., *Pseudomonas* spp., *Achromobacter* spp., and *Flavobacterium* spp.—possess effective metabolic mechanisms for glyphosate degradation. In addition, plants species such as *Vulpia myuros* and *Amaranthus tricolor* show potential for phytoextraction of this herbicide, with complementary techniques such as vermiremediation. In the specific case of Nariño, the diversity of soil types calls for tailored bioaugmentation and biostimulation strategies to optimize recovery. In conclusion, microbial- and plant-based bioremediation represent sustainable and promising alternative for mitigating glyphosate contamination in Nariño. Nevertheless, establishing baseline data on herbicide concentrations across soil types, along with a management plan adapted to the region's socioecological and productive conditions is essential for effective implementation.

Keywords: Pesticide contamination; Microbial degradation; Environmental restoration; Agricultural soils; Sustainable strategies; Natural sciences.

INTRODUCCIÓN

El glifosato es un herbicida de amplio espectro, derivado fosfometilo del aminoácido glicina, cuyo ingrediente activo es el N-(fosfometil) glicina. Su principal modo de acción consiste en inhibir la vía del ácido shikímico, responsable de la síntesis de aminoácidos aromáticos y otros metabolitos esenciales para el crecimiento vegetal. Como resultado, el glifosato detiene procesos metabólicos fundamentales y conduce a la muerte de las plantas, lo que lo ha convertido en una de las sustancias más utilizadas a nivel mundial para el manejo y control de arvenses en sistemas agrícolas y en jardinería (López-Chávez et al., 2021; Singh et al., 2020; Sviridov et al., 2015; Ortega & Ponce, 2022). Su aplicación se realiza generalmente mediante aspersión líquida sobre las hojas, aunque se han descrito también usos en suelo, lo que facilita su dispersión y potencial acumulación en diferentes compartimentos ambientales.

En Colombia, el uso de glifosato tiene una doble dimensión: por un lado, se emplea de manera intensiva en actividades agrícolas, especialmente en cultivos como café, papa, maíz y caña panelera; por otro, ha sido históricamente la herramienta central de los programas de erradicación de cultivos ilícitos. Desde finales de la década de 1970 se iniciaron las fumigaciones experimentales, y a partir de los años 2000, bajo el marco del Plan Colombia, el glifosato se consolidó como estrategia oficial para reducir los cultivos de coca y amapola (Mejía, 2017). Estas aspersiones aéreas, concentradas principalmente en departamentos como Putumayo y Nariño, han generado controversias debido a la deriva de las aplicaciones, que afecta no solo las plantaciones ilícitas sino también cultivos legales y ecosistemas naturales (González & Martínez, 2022). A pesar de la magnitud de las campañas de aspersión, los informes muestran que las áreas cultivadas con coca no se han reducido de forma significativa, lo que cuestiona la eficacia de esta medida y

ha reforzado el debate en torno a sus impactos ambientales, sociales y de salud pública (Gaviria Melo et al., 2020; UNODC, 2023).

Una vez liberado en el ambiente, el glifosato presenta una dinámica compleja. Puede permanecer en la superficie de las plantas hasta ser metabolizado o arrastrado por escorrentía, llegar al suelo y adsorberse a minerales y partículas de materia orgánica, o lixiviar hacia aguas subterráneas. En el suelo, puede transformarse en productos como fosfato inorgánico, amonio, dióxido de carbono, glioxilato y aminometilfosfónico (AMPA), este último considerado un metabolito persistente y tóxico (Guijarro et al., 2018; Zabaloy et al., 2022; Abou-Zeid et al., 2024; Oliveira et al., 2024). Se ha reportado que la acumulación de glifosato y AMPA en matrices edáficas produce una disminución de la fertilidad, alteraciones en la estructura del suelo y pérdida de biodiversidad microbiana y macrofaunística, afectando procesos fundamentales como la descomposición de materia orgánica y los ciclos biogeoquímicos (Busse et al., 2001; Lancaster et al., 2010; Lane et al., 2012; Kulikova et al., 2020). Además, el uso repetido del herbicida ejerce una presión de selección que favorece la emergencia de malezas resistentes, reduciendo la efectividad de su aplicación y comprometiendo la sostenibilidad de los sistemas productivos (Ortega & Ponce, 2022; Müller et al., 2024).

La toxicidad del glifosato no se limita a las plantas y al suelo. Se ha documentado su impacto sobre lombrices de tierra y otros organismos edáficos, así como sus efectos citotóxicos en animales y seres humanos expuestos de manera prolongada, incluyendo irritaciones dérmicas, problemas respiratorios y alteraciones metabólicas (Gaupp-Berghausen et al., 2015; de Lima e Silva & Pelosi, 2023). Por estas razones, la clasificación de este herbicida ha sido objeto de debate internacional, llegando a ser considerado un probable carcinógeno por la Organización Mundial de la Salud.

El caso del departamento de Nariño resulta especialmente relevante. Se trata de un territorio con vocación agrícola, en el que los suelos son la base de la seguridad alimentaria y de la economía regional. Sin embargo, los sistemas de producción convencionales han promovido el uso intensivo de agroquímicos, generando una pérdida progresiva de la fertilidad edáfica y aumentando la vulnerabilidad frente a procesos de erosión y degradación (Arteaga et al., 2016; Campo Quesada et al., 2016). La diversidad edáfica del departamento incluye órdenes como andisoles, inceptisoles, mollisoles, ultisoles y aridisoles, siendo los dos primeros los más representativos (IGAC, 2015). Muchos de estos suelos han recibido aplicaciones continuas de glifosato tanto en agricultura como en aspersiones aéreas para la erradicación de cultivos ilícitos, con lo cual se ha incrementado la presión sobre los ecosistemas locales (FAO, 2020; Zuñiga et al., 2018). La expansión de la frontera agrícola, sumada a prácticas como la labranza intensiva y la eliminación de coberturas, ha agravado aún más la degradación de los suelos en la región.

Frente a esta problemática, la biorremediación surge como una alternativa con alto potencial para recuperar áreas degradadas. Este enfoque se basa en el uso de organismos vivos —bacterias, hongos, plantas o consorcios microbianos— capaces de transformar, inmovilizar o degradar contaminantes como el glifosato (Ermakova et al., 2010; Singh et al., 2020). Se ha documentado que bacterias de los géneros *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Achromobacter* y *Flavobacterium*, entre otros, poseen rutas metabólicas específicas que les permiten utilizar al herbicida como fuente de carbono, fósforo o nitrógeno (Sviridov et al., 2012; Zhan et al., 2018;

Zabaloy et al., 2022; Zhang et al., 2024). De manera complementaria, algunas especies vegetales como *Vulpia myuros* y *Amaranthus tricolor* han mostrado eficiencia en la remoción de glifosato de suelos contaminados, lo que abre la posibilidad de integrar la fitorremediación como estrategia conjunta (Gao et al., 2023; Mohy-Ud-Din et al., 2023; Hernández et al., 2024; Kumar et al., 2024;). Más recientemente, se ha explorado el uso de hongos filamentosos como *Trichoderma spp.* y *Aspergillus spp.*, así como técnicas de vermirremediación con lombrices como *Eisenia foetida*, que favorecen tanto la degradación del herbicida como la recuperación de la estructura y fertilidad del suelo (Spinelli et al., 2021; Soto, 2019).

En este contexto, y considerando que el departamento de Nariño concentra una alta diversidad de suelos y prácticas agrícolas, surge la necesidad de analizar qué estrategias de biorremediación pueden aplicarse para enfrentar la contaminación causada por el glifosato. La pregunta orientadora de este trabajo es: ¿qué alternativas de biorremediación pueden contribuir a la recuperación de los suelos contaminados con glifosato en Nariño? El objetivo fue documentar y evaluar las estrategias microbianas y vegetales de biorremediación reportadas en la literatura, así como valorar su aplicabilidad en el contexto socioecológico del departamento, con el fin de aportar elementos que orienten planes de manejo sostenible y restauración de suelos en la región.

METODOLOGÍA

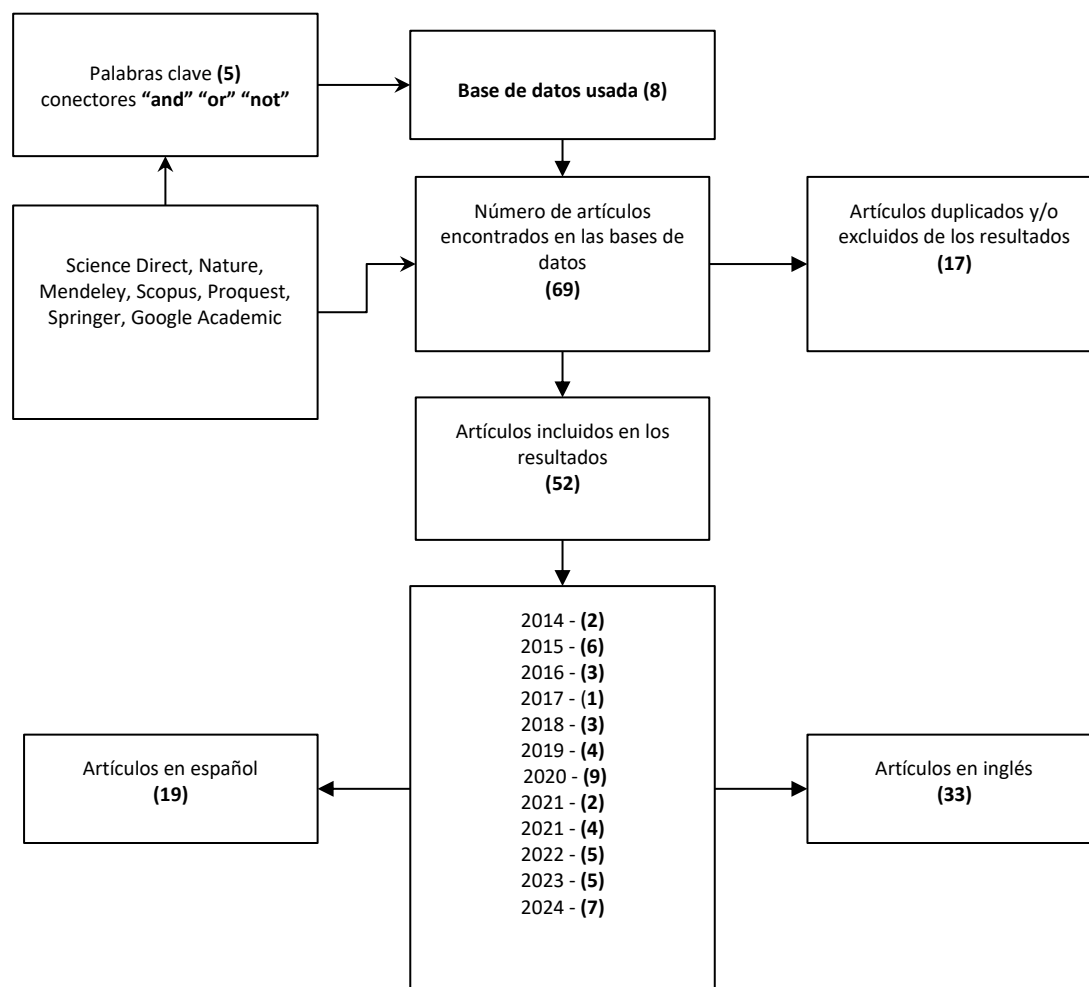
Se llevó a cabo una revisión bibliográfica sistemática con el propósito de identificar, analizar y sintetizar la información disponible sobre estrategias de biorremediación aplicables a suelos contaminados con glifosato, teniendo en cuenta las particularidades socioecológicas del departamento de Nariño. La búsqueda de documentos se realizó en bases de datos internacionales y nacionales como Scopus, ScienceDirect, Springer, ProQuest, Nature, Agrosavia y Google Académico, en un rango temporal comprendido entre 2013 y 2024. Para garantizar la pertinencia de los resultados se emplearon combinaciones de palabras clave en inglés y en español, entre ellas glyphosate, bioremediation, microbial degradation, soil restoration y pesticide pollution, articuladas mediante operadores booleanos (“AND”, “OR” y “NOT”).

Los criterios de inclusión consideraron artículos originales, experimentales y de revisión, así como documentos técnicos que abordaran los procesos de degradación del glifosato por microorganismos, las estrategias de biorremediación en diferentes tipos de suelo y el contexto socioecológico del uso de este herbicida en Colombia, con especial énfasis en Nariño. Se excluyeron publicaciones duplicadas, documentos sin acceso al texto completo y aquellos que no aportaban evidencia directa sobre la degradación del glifosato o sobre alternativas de recuperación de suelos. En total se revisaron 62 publicaciones, de las cuales 45 fueron seleccionadas para el análisis final. El procedimiento de búsqueda, exclusión y sistematización se resume en la Figura 1, donde se observa el algoritmo seguido para la selección de literatura y el número de artículos considerados en cada fase.

Una vez consolidada la base documental, la información se organizó de manera que permitiera comprender primero el contexto socioecológico de Nariño y la diversidad de sus suelos, posteriormente los principios generales de la biorremediación y los mecanismos a través de los cuales actúa en el suelo, incluyendo las rutas metabólicas descritas para la degradación del glifosato y las

enzimas implicadas. Sobre esta base se abordaron ejemplos y estudios de caso reportados en la literatura, tanto con microorganismos como con plantas, con el fin de mostrar la evidencia existente en torno a la biodegradación de este herbicida. Finalmente, se examinaron las alternativas más prometedoras para el departamento de Nariño, destacando las posibilidades de aplicar estrategias de bioaumentación y bioestimulación diferenciadas según el tipo de suelo predominante en la región. El análisis de la información se desarrolló desde un enfoque cualitativo, complementado con estadística descriptiva, lo que permitió identificar tendencias, enfoques metodológicos y hallazgos relevantes para orientar la discusión del manuscrito.

Figura 1. Algoritmo resultado de la búsqueda de información y obtención de resultados para la revisión.



Fuente: Elaboración propia

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La búsqueda de información reveló que, aunque la biorremediación con glifosato se ha estudiado durante varios años, particularmente en el departamento de Nariño no existe todavía una estrategia consolidada basada en el uso de microorganismos para la recuperación de suelos degradados por este herbicida. La consulta de las bases de datos con las combinaciones de palabras clave permitió

identificar 52 artículos incluidos en esta revisión. Adicionalmente, se utilizaron otras fuentes de información técnica para analizar las posibles alternativas de biorremediación de suelos contaminados en el departamento. A partir de ello, se exponen a continuación aspectos asociados al contexto socioecológico de Nariño, como una primera aproximación al problema de la degradación edáfica.

Contexto socioecológico en el departamento

El departamento de Nariño se encuentra dividido en 13 subregiones que reflejan diversidad territorial, complejidad de las conflictividades y particularidades productivas. De acuerdo con la FAO (2020), estas diferencias evidencian tanto potencialidades como brechas en el desarrollo regional. Según cifras del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), para 2023 la población ascendía a 1,70 millones de habitantes, de los cuales 51,3 % correspondía a mujeres y 48,7 % a hombres. Como ocurre en muchas otras regiones del país, la economía de Nariño depende en gran medida de la agricultura. En las zonas de la sierra predominan cultivos de papa, arveja, frijol, café, caña panelera y fique, mientras que en municipios costeros se desarrollan cultivos de palma, cacao, coco y plátano. En climas medios se destacan la producción de limón, aguacate, granadilla, tomate, fresa y mora. Esta diversificación agrícola confirma la vocación productiva del departamento y su potencial en la seguridad alimentaria regional (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2020).

La amplia diversidad productiva se relaciona con la variedad de suelos presentes en el territorio. Se han descrito al menos siete tipos distintos, siendo la textura franco-arenosa la más frecuente, caracterizada por su composición equilibrada de arena, limo y arcilla. Estas condiciones favorecen la permeabilidad y el drenaje del agua, así como la aireación de las raíces y la retención de nutrientes, lo que promueve el desarrollo de plantas saludables (Bastidas Burbano & Botina Ortega, 2018; IGAC, 2004; Zuñiga et al., 2018).

La zonificación agroecológica permite observar diferencias marcadas en las distintas áreas del departamento. En la zona norte predominan suelos con alta acidez y saturación de aluminio, carbono y fósforo, típicos de páramos y selvas altoandinas, poco fértiles y con limitaciones para la producción. En la zona central se encuentran suelos con mayor vocación agrícola, aptos para cultivos como papa, cebada, arveja y hortalizas. Hacia el suroriente predominan suelos degradados y erosionados, afectados por sequías prolongadas, lluvias intensas y actividades extractivas. En la zona suroccidente la situación es crítica: la ganadería extensiva y la potrerización han llevado a la pérdida de recursos hídricos y a la disminución de la fertilidad edáfica (Bastidas Burbano & Botina Ortega, 2018; FAO, 2020; IGAC, 2004; Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2020; Zuñiga et al., 2018).

A nivel de clasificación edáfica, en Nariño predominan los andisoles y los inceptisoles, seguidos en menor proporción por mollisoles, ultisoles y aridisoles (IGAC, 2015; Méndez & Zapata-Rivera, 2021). Los andisoles, típicos de zonas volcánicas, presentan alto contenido de materia orgánica y buena fertilidad. Los inceptisoles son suelos incipientes con fertilidad variable, frecuentes en laderas de montaña. Los mollisoles, oscuros y ricos en nutrientes, se localizan en valles interandinos, mientras que los ultisoles, ácidos y con baja fertilidad, son comunes en regiones tropicales. Finalmente, los aridisoles predominan en zonas áridas y semiáridas con baja pluviosidad. Se ha documentado que la aplicación de glifosato ha sido más frecuente en inceptisoles y ultisoles, lo que resulta preocupante ya que su acidez y baja fertilidad

dificultan la recuperación natural y limitan la actividad microbiana degradadora del herbicida (IGAC, 2015; Bastidas Burbano & Botina Ortega, 2018; Zuñiga et al., 2018).

La diversidad y versatilidad de los suelos de Nariño explican tanto su aptitud agrícola como su vulnerabilidad frente al uso intensivo del glifosato. Además, este territorio ha sido epicentro de la producción de hoja de coca: de los 14 principales sitios de producción en el país, seis se encuentran en este departamento (UNODC, 2023). En este contexto, las comunidades y autoridades locales han manifestado que el retorno de la aspersión aérea sería un error, proponiendo en su lugar la sustitución de cultivos ilícitos por sistemas legales de producción (González & Martínez, 2022). De hecho, entre 2014 y 2019 el Estado colombiano fue condenado a indemnizar a agricultores de Nariño por los daños ocasionados en cultivos lícitos debido a la aspersión con glifosato (González & Martínez, 2022). Estas problemáticas han motivado la formulación de marcos normativos para regular su uso desde la década de 1990, aunque las afectaciones ambientales y en salud humana persisten y han llevado a su clasificación como probable carcinógeno por la OMS (Gaviria Melo et al., 2020).

Finalmente, según la Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC, 2023), entre 2021 y 2022 el municipio de Tumaco registró un incremento de aproximadamente 5.000 hectáreas de cultivos ilícitos. Este aumento evidencia que las fumigaciones aéreas no han sido efectivas en la reducción de áreas sembradas, pero sí han intensificado la exposición del suelo al herbicida. Por esta razón, antes de orientar estrategias de biorremediación será necesario determinar las concentraciones de glifosato en los diferentes órdenes de suelo, diferenciando entre aplicaciones agrícolas y aspersiones aéreas. Este aspecto es crucial, ya que la vía aérea implica dosis mayores y deriva hacia áreas no objetivo, mientras que la aplicación terrestre responde a esquemas de ultra bajo volumen (UBV) con efectos más localizados.

Biorremediación de suelos contaminados con glifosato

La biorremediación constituye una estrategia que utiliza organismos vivos, principalmente microorganismos y plantas, para transformar, degradar o inmovilizar compuestos contaminantes presentes en el ambiente. En el caso del glifosato, diversos estudios han demostrado que bacterias y hongos presentes en el suelo y en el agua son capaces de degradarlo y reducir su concentración en el medio. Estos procesos metabólicos generan productos de transformación como ácido aminometilfosfónico (AMPA) y glioxilato, que presentan menor toxicidad que la molécula original (Singh et al., 2020; Sviridov et al., 2012; Sviridov et al., 2015; Tofiño Rivera et al., 2020; Ibrahim et al., 2023). Investigaciones recientes han ampliado el conocimiento sobre la capacidad de consorcios microbianos para lograr la biodegradación completa del herbicida, mostrando mejores resultados que el uso de cepas individuales (Zhang et al., 2024).

El papel de los microorganismos del suelo es clave para disminuir la concentración ambiental del glifosato. Se han descrito principalmente dos vías de degradación. La primera depende de la actividad enzimática liasa, que rompe el enlace C-P y libera sarcosina y fosfato. Esta ruta es utilizada por microorganismos que emplean el herbicida como fuente de fósforo, y aunque conduce a la mineralización del glifosato en dióxido de carbono y agua, rara vez ocurre en condiciones naturales porque las enzimas implicadas se inducen solo en escenarios de deficiencia de fósforo inorgánico (Guijarro et al., 2018; Ortega & Ponce, 2022). La segunda vía corresponde al metabolismo del glifosato como fuente de nitrógeno, donde la molécula se transforma

en glioxilato y AMPA. En esta ruta, muchas bacterias del suelo pueden producir simultáneamente sarcosina y AMPA, lo cual se ha confirmado en estudios experimentales (Guijarro et al., 2018; Ortega & Ponce, 2022; Zhan et al., 2018).

Las rutas metabólicas asociadas a estas transformaciones se han estudiado de forma detallada. La vía C-P liasa requiere la activación de un operón específico (phn), que codifica cerca de 14 proteínas encargadas del transporte y escisión del glifosato, liberando fósforo inorgánico y N-metilglicina (sarcosina), la cual puede mineralizarse mediante la acción de la enzima sarcosina oxidasa (Zabaloy et al., 2022). Por otro lado, la vía del glifosato oxidorreductasa (GOX) rompe el enlace C-N y produce AMPA junto con glioxilato, que algunas bacterias utilizan como fuente de carbono. Se ha descrito también que las enzimas glicina oxidasas, codificadas por el gen thiO, pueden catalizar reacciones de desaminación oxidativa sobre el glifosato y otros compuestos amínicos, contribuyendo a su degradación (Zabaloy et al., 2022). Estudios basados en modelado molecular han permitido comprender mejor la interacción entre estas enzimas y el herbicida, ofreciendo perspectivas para mejorar la eficiencia de la biodegradación (Kumar et al., 2024).

El suelo es una matriz ambiental compleja y dinámica, por lo que la degradación del glifosato no depende únicamente de la actividad microbiana. Factores como el pH, la temperatura, la concentración de fosfatos, el contenido de materia orgánica y la disponibilidad de oxígeno determinan la biodisponibilidad del herbicida y sus metabolitos (Guijarro et al., 2018; Ortega & Ponce, 2022; Zabaloy et al., 2022; Zhan et al., 2018). Investigaciones recientes confirman que la interacción del glifosato con fracciones minerales y nutrientes influye en su movilidad y persistencia, condicionando la eficacia de los procesos de degradación microbiana (Abou-Zeid et al., 2024; Oliveira et al., 2024). Asimismo, la aplicación reiterada del herbicida modifica la estructura del microbiota, lo que puede favorecer la adaptación de las comunidades edáficas y acelerar las tasas de degradación, aunque estos efectos dependen de la estabilidad de las poblaciones activas y de los intervalos entre aplicaciones (Guijarro et al., 2018). En este sentido, se ha resaltado que los consorcios y comunidades microbianas diversas resultan más eficientes que cepas individuales en la remoción de herbicidas persistentes, lo que refuerza la importancia de abordar la biorremediación desde un enfoque comunitario (Hernández et al., 2024; Zhang et al., 2024).

En relación con la composición microbiana, se ha descrito que los filos *Proteobacteria*, *Actinobacteria*, *Acidobacteria* y *Bacteroidetes* son abundantes en suelos agrícolas; sin embargo, la contaminación con glifosato produce una disminución de *Actinobacteria* y un aumento de *Bacteroidetes*, particularmente de las familias *Flammeovirgaceae* y *Saprospiraceae* (Guijarro et al., 2018; Sviridov et al., 2012; Sviridov et al., 2015). Este patrón indica que numerosos taxones edáficos pueden emplear el glifosato como fuente de carbono, nitrógeno y fósforo, incluso sin exposición previa, lo cual refleja su potencial natural para la biorremediación. La baja especificidad enzimática facilita que diversos géneros, como *Ochrobactrum*, *Rhizobium*, *Pseudomonas* y *Bradyrhizobium*, participen en su degradación mediante rutas metabólicas complementarias (Zabaloy et al., 2022). Una síntesis de los principales géneros microbianos y las vías que utilizan se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Microorganismos con capacidad de degradar glifosato en el suelo.

Microorganismos	Mecanismo de acción
<i>Achromobacter spp.</i>	Degradación por medio de C-P liasa (Sviridov, Alexey V. et al., 2012).
<i>Flavobacterium spp.</i>	Utilizándolo como única fuente de fósforo y metabolizado a ácido aminometilfosfónico - AMPA (Sviridov, A. V. et al., 2015).
<i>Streptomyces isolates spp.</i>	Degradación del glifosato de manera independiente de fosfato, a través de la escisión del enlace C-P, acompañado por la formación de sarcosina (Rebai et al., 2023).
<i>Bacillus spp.</i>	Utilizando dos vías enzimáticas simultáneas empleando una C-P liasa y una glifosato oxidorreductasa (Fan et al., 2012).
<i>Penicillium spp.</i>	Degradación del glifosato por medio de la acción oxidorreductasa (AMPA) (Adelowo et al., 2014; Zhao et al., 2015).
<i>Pseudomonas spp.</i>	Tiene dos rutas distintas, la degradación a AMPA y mediante la ruptura de glifosato a glicina (Zhao et al., 2015).
<i>Rhizobiaceae meliloti</i>	Utiliza la vía C-P liasa generando primero sarcosina y después glicina (Liu et al., 1991).
<i>Ochrobactrum spp.</i>	Utilizando dos vías enzimáticas simultáneas empleando una C-P liasa y una glifosato oxidorreductasa (Hadi et al., 2013).
<i>Arthrobacter spp.</i>	Utiliza la vía oxidorreductasa (AMPA) (Pipke & Amrhein, 1988).
<i>Alcaligenes sp.</i>	Utiliza la vía C-P liasa (Lerbs et al., 1990).
<i>Agrobacterium spp.</i>	Posee vía AMPA y C-P liasa (Fan et al., 2012).
<i>Aspergillus spp.</i>	Vía AMPA y metilamina (Adelowo et al., 2014; Fan et al., 2012).

Fuente: Elaboración propia, referencias en la tabla.

Los estudios sobre bacterias con capacidad de degradación de glifosato han identificado múltiples géneros relevantes. En *Bacillus spp.* se ha demostrado que la degradación ocurre por la escisión del enlace C–N mediada por la enzima glifosato oxidorreductasa (Acosta-Cortés et al., 2019; Fan et al., 2012). De manera similar, especies de *Pseudomonas spp.* degradan el herbicida mediante la vía oxidorreductasa, logrando transformarlo en AMPA con eficiencias cercanas al 50 % (Zhao et al., 2015). En relación con la vía enzimática liasa, se ha reportado que géneros como *Alcaligenes spp.*, *Arthrobacter spp.* y *Ochrobactrum spp.* pueden utilizar el glifosato como fuente de fósforo y carbono en condiciones de escasez de nutrientes (Fan et al., 2012; Lerbs et al., 1990; Sviridov et al., 2015). Por otro lado, estudios in vitro con enterobacterias, incluyendo *Serratia liquefaciens*, *Klebsiella variicola*, *Enterobacter cloacae* y *Enterobacter ludwigii*, han evidenciado reducciones significativas en la concentración del herbicida, disminuyendo su efecto nocivo sobre las plantas (Mohy-Ud-Din et al., 2023). En cuanto a los hongos, se ha descrito que *Trichoderma spp.*, *Aspergillus spp.* y *Penicillium spp.* degradan el glifosato mediante la enzima glifosato desaminasa, transformándolo en AMPA o liberando fósforo para ser utilizado como nutriente, mientras emplean el carbono restante como fuente de energía (Adelowo et al., 2014; Kunanbayev et al., 2019; Spinelli et al., 2021).

Además de los microorganismos, la fitorremediación se presenta como una alternativa complementaria para recuperar suelos contaminados. Se ha reportado que *Vulpia myuros* (Poaceae), una especie cosmopolita, puede remover hasta un 80 % del glifosato en suelos contaminados en un periodo de 30 días (Gao et al., 2023). En el caso de *Amaranthus tricolor*, especie ornamental presente en Nariño, se ha observado una eficiencia del 99 % en la degradación de concentraciones de hasta 1000 ppm en solo 5 días, cuyo proceso se vio favorecido por la asociación con cepas de *Bacillus spp.* y *Pseudomonas spp.* lo que evidencia el potencial de estrategias combinadas entre plantas y bacterias (A et al., 2013). De manera similar, *Lotus corniculatus* (Fabaceae), adaptada a climas fríos y húmedos del departamento, mostró una capacidad de eliminación del 97 % del herbicida en suelo al establecer asociaciones simbióticas con *Ochrobactrum spp.* y *Rhizobium spp.* En este caso, la planta libera exudados que estimulan el crecimiento de estas bacterias, potenciando la degradación y reduciendo significativamente la concentración del contaminante (Mohy-Ud-Din et al., 2023).

Una estrategia complementaria que ha demostrado potencial es la vermirremediación, la cual emplea lombrices de tierra para favorecer la degradación de contaminantes. Estudios con *Eisenia foetida* (Lumbricidae) han reportado reducciones de herbicidas cercanas al 60 %, gracias a procesos metabólicos directos y a la acción indirecta de los microorganismos asociados al sistema digestivo de los anélidos. Además de contribuir a la degradación, la presencia de lombrices mejora propiedades clave del suelo como la aireación, la fertilidad y la disponibilidad de nutrientes (Soto, 2019).

En el caso del departamento de Nariño, donde existen aproximadamente 5123 Unidades de Producción Sostenible (UPS), resulta fundamental analizar alternativas de recuperación de suelos que respondan a las problemáticas generadas tanto por prácticas agrícolas convencionales como por la aspersión aérea empleada en la erradicación de cultivos ilícitos (FAO, 2020). Estas UPS promueven prácticas agroecológicas orientadas a la conservación de los suelos, lo que facilita la aceptación de estrategias como la biorremediación, en la medida en que se articulen con procesos de transferencia de tecnología y apropiación comunitaria (Vodouhe & Khasa, 2015). De hecho, iniciativas locales ya han avanzado en la capacitación de productores en buenas prácticas agrícolas, manejo de suelos, poscosecha y comercialización, lo que evidencia un creciente interés en alternativas sostenibles para reducir el uso de glifosato y restaurar las áreas impactadas (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2020).

No obstante, la implementación de estas estrategias enfrenta limitaciones. La mayoría de los ensayos sobre degradación de glifosato se han desarrollado en microcosmos o columnas de suelo, lo que dificulta extrapolar los resultados a condiciones de campo, aunque representan un avance frente a los estudios in vitro con cepas aisladas (Zabaloy et al., 2022). Además, los enfoques de bioaumentación con cepas puras o consorcios simples han mostrado baja eficiencia en campo debido a problemas de establecimiento y adaptación a los factores abióticos, como pH, estructura del suelo o contenido de materia orgánica (Thieffry et al., 2024). A ello se suma la heterogeneidad en las formulaciones comerciales del herbicida y la falta de información sobre la justificación de las dosis utilizadas en los ensayos, lo que dificulta la comparación de tasas de degradación entre estudios. Esta limitación es particularmente relevante en Nariño, donde el glifosato ha sido aplicado no solo en agricultura, sino también en aspersiones aéreas para la erradicación de cultivos ilícitos (Thieffry et al., 2024).

Otro aspecto crítico es que la eficacia de la degradación depende en gran medida de las características edáficas y del manejo agrícola. La mayoría de los estudios se han realizado en suelos arcillosos a franco-limosos, y solo unos pocos en suelos francos-arenosos. Factores como la textura, el contenido de materia orgánica, la biota, las condiciones climáticas y las prácticas de manejo (fertilización, labranza, cultivos de cobertura) determinan diferencias importantes en la persistencia y degradación del glifosato (Mejía, 2017; Zabaloy et al., 2022).

En este marco, y considerando la diversidad de suelos del departamento, la recuperación requiere una ruta metodológica clara: en primer lugar, realizar una evaluación integral del sitio que incluya la extensión de las áreas afectadas, el nivel de contaminación y la caracterización fisicoquímica y biológica del suelo. A partir de este diagnóstico, es posible definir estrategias diferenciadas de biorremediación. En la Tabla 2 se presenta un resumen de las características de los principales suelos en Nariño, la afectación del glifosato y las posibles alternativas para su recuperación.

Tabla 2. Estrategias de biorremediación para suelos contaminados con Glifosato en el departamento de Nariño.

Tipo de Suelos	Efectos del Glifosato en el suelo	Estrategia de biorremediación
Andisoles (suelos jóvenes, derivados de cenizas volcánicas, porosos, textura suelta y ligera). Alta acidez, alta diversidad microbiana, buen contenido de materia orgánica. Aptos para agricultura.	Alta adsorción del glifosato a partículas del suelo, lo que reduce su movilidad y disponibilidad. Presencia de microorganismos activos favorece la degradación, aunque su eficiencia puede variar.	Utilizar microorganismos degradadores adaptados a suelos volcánicos. Inocular consorcios microbianos. Implementar técnicas de riego o aspersión y realizar seguimiento de la actividad microbiana y la concentración de glifosato.
Inceptisoles (suelos poco desarrollados, con estructura débil y fertilidad variable). Actividad biológica y características químicas heterogéneas.	Baja disponibilidad de nutrientes y escasa actividad biológica pueden limitar la degradación del glifosato. Su persistencia es variable.	Técnicas de bioestimulación para activar la microbiota nativa. Aplicar sustratos que promuevan degradación microbiana (compost, fertilizantes orgánicos). Realizar seguimiento de la actividad microbiana y la concentración de glifosato.
Mollisoles (suelos ricos en materia orgánica y nutrientes, con estructura bien desarrollada y alta fertilidad). Textura media a gruesa, pH neutro o ligeramente alcalino.	Alta actividad biológica y buena estructura favorecen la degradación del glifosato, aunque su eficiencia depende de las concentraciones iniciales.	Promover la actividad microbiana nativa, mantener condiciones favorables para la descomposición. Prácticas agrícolas sostenibles, aumento de materia orgánica, siembra de cultivos de cobertura. Monitoreo constante de actividad microbiana.
Aridisoles (suelos secos, pobres en materia orgánica, con baja actividad biológica y alta acumulación de sales solubles). Textura variable y escasa cobertura vegetal.	Baja capacidad de retención de agua y nutrientes. Baja actividad microbiana limita la degradación del glifosato, que puede persistir en el suelo.	Técnicas de bioestimulación para activar la microbiota nativa. Aplicar sustratos que promuevan degradación microbiana (compost, fertilizantes orgánicos). Realizar seguimiento de la actividad microbiana y la concentración de glifosato.
Ultisoles (suelos desarrollados, ácidos, pobres en nutrientes, con actividad microbiana variable). Alta lixiviación de bases y baja fertilidad.	Alta lixiviación del glifosato debido a baja capacidad de adsorción. Suelos ácidos y bajos nutrientes limitan la actividad microbiana.	Emplear degradadores de glifosato adaptados a suelos ácidos. Inoculación microbiana dirigida. Incorporar enmiendas orgánicas. Aplicar técnicas de manejo hídrico. Monitorear actividad microbiana y niveles de glifosato.

Fuente: Elaboración propia, información tomada de: a) Tipos de suelos en el departamento de Nariño (FAO, 2020; FEDEPAPA & Fondo Nacional del Fomento de la Papa, 2023; IGAC, 2004; IGAC, 2015; Ministerio de Justicia y del Derecho - Observatorio de Drogas de Colombia, 2020; Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2020; Zuñiga et al., 2018). b) Afectación de suelos por glifosato, (Carretta et al., 2021; Dotor-Robayo et al., 2022; Gómez Ortiz et al., 2017) c) Estrategias de Biorremediación para suelos contaminados en el departamento de Nariño (Adelowo et al., 2014; Durán Acosta & Ladera Hernández, 2016; Ermakova et al., 2010; Rebai et al., 2023; Zabaloy et al., 2022).

Tomando en cuenta el último reporte de la UNODC y la información disponible sobre el uso y los tipos de suelo en el departamento de Nariño, se hace necesario diseñar estrategias de biorremediación que integren tanto el uso de microorganismos como de plantas. De acuerdo con el mapa de suelos elaborado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2015), predominan los andisoles y los inceptisoles, lo que plantea la necesidad de aplicar bioaumentación con bacterias y hongos capaces de degradar glifosato. En este sentido, especies de los géneros *Pseudomonas spp.* y *Bacillus spp.*, presentes en los suelos de la región, representan candidatos idóneos para procesos de inoculación dirigida. De manera complementaria, se pueden adicionar cepas con capacidad de adaptación a condiciones *in vivo*, y aplicar estrategias de bioestimulación orientadas a potenciar el desarrollo de poblaciones nativas con potencial de degradación (Cubides Guerra, 2021).

A estas acciones debe sumarse un esquema de monitoreo constante que permita cuantificar la concentración de glifosato en el suelo antes y después del tratamiento, con el fin de establecer los porcentajes de biodegradación alcanzados y ajustar las intervenciones según el tipo de suelo. En la Figura 2 se sintetiza esta información, mostrando el contexto espacial y ecológico del uso del herbicida mediante aspersión aérea en Nariño, con énfasis en la concentración de cultivos ilícitos en Tumaco y la distribución predominante de suelos. Asimismo, se señalan las estrategias diferenciadas de biorremediación según las características edáficas y se ilustran los principales géneros microbianos con capacidad para degradar glifosato, lo que evidencia la necesidad de enfoques restaurativos adaptados a las particularidades del territorio.

Figura 2. Estrategias de biorremediación dirigida a suelos afectados por glifosato en la región de Nariño, Colombia.



Fuente: Elaboración propia a partir de información tomada y modificada de Atlas de Justicia ambiental (2024) <https://ejatlas.org/>.

Será necesario realizar una evaluación detallada de la afectación de los suelos contaminados con glifosato como línea base para la implementación de estrategias de recuperación. Este diagnóstico debe contemplar la concentración del contaminante, el grado de afectación, así como una caracterización completa de las propiedades fisicoquímicas, biológicas y socioecológicas de los suelos. A partir de ello será posible establecer programas de manejo sostenible que orienten la mitigación del impacto negativo del herbicida y favorezcan la seguridad alimentaria y la protección de la salud del suelo en la región.

CONCLUSIONES

El uso intensivo e indiscriminado de glifosato en el departamento de Nariño ha generado impactos negativos sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, lo que resalta la urgencia de implementar estrategias sostenibles para su recuperación. La revisión realizada demostró que diversos microorganismos, en particular bacterias de los géneros *Bacillus spp.* y *Pseudomonas spp.*, así como hongos como *Aspergillus spp.* y *Penicillium spp.*, poseen mecanismos metabólicos capaces de degradar este herbicida, lo que convierte a la biorremediación en una alternativa prometedora y de bajo impacto ambiental.

En el contexto socioecológico del departamento, se identificó que la diversidad de suelos —principalmente andisoles e inceptisoles— exige estrategias diferenciadas de bioaumentación y bioestimulación. Estas deben contemplar la inoculación dirigida de microorganismos con potencial de degradación y el fortalecimiento de las comunidades nativas adaptadas a las condiciones edáficas locales. La combinación con estrategias complementarias, como la fitorremediación, refuerza el potencial de restauración al integrar procesos biológicos diversos y favorecer la resiliencia de los sistemas agrícolas y naturales.

Finalmente, se resalta la necesidad de establecer una línea base que incluya la concentración de glifosato, el grado de afectación y las características socioecológicas de los suelos de Nariño. Este diagnóstico permitirá diseñar planes de manejo adaptados al territorio, garantizar la efectividad de las intervenciones y promover la apropiación comunitaria de estas prácticas. De esta manera, la biorremediación se proyecta no solo como una herramienta de recuperación ambiental, sino también como un aporte al manejo sostenible de los recursos y a la seguridad alimentaria de la región.

REFERENCIAS

Abdel-Megeed A., Sadik M.W., Al-Shahrani, H.O., & Ali, H.M. (2013). Phyto-microbial degradation of glyphosate in riyadh area. *International Journal of Microbiology Research*, 5(5), 458-466. <https://doi.org/10.9735/0975-5276.5.5.458-466>

Abou-Zeid, A., Mahmoud, K., & Hassan, M. (2024). Degradation of atrazine, glyphosate, and 2,4-D in soils. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 59(3), 245–255. <https://doi.org/10.1080/03601234.2024.2305596>

Acosta-Cortés, A. G., Martínez-Ledezma, C., López-Chuken, U. J., Kaushik, G., Nimesh, S., & Villarreal-Chiu, J. F. (2019). Polyphosphate recovery by a native *Bacillus cereus* strain as a direct effect of glyphosate uptake. *The ISME Journal*, 13(6), 1497-1505. <https://doi.org/10.1038/s41396-019-0366-3>

Adelowo, F. E., Olu-Arotiowa, O. A., & Amuda, O. S. (2014). Biodegradation of Glyphosate by Fungi Species. *Advances in Bioscience and Bioengineering*, 2(1), 104. <https://www.airitilibrary.com/Article/Detail/P20160310003-201412-201603100007-201603100007-104-118>

Arteaga J., J. C., Navia E., J. F., & Castillo, J. A. (2016). Comportamiento de variables químicas de un suelo sometido a distintos usos, departamento de Nariño, Colombia. *Revista De Ciencias Agrícolas*, 33(2), 62-75. <https://doi.org/10.22267/rcia.163302.53>

Bastidas Burbano, K. T., & Botina Ortega, A. J. (2018). Características fisicoquímicas del suelo y su asociación con la materia orgánica en diferentes sistemas productivos, Nariño.

Busse, M. D., Ratcliff, A. W., Shestak, C. J., & Powers, R. F. (2001). Glyphosate toxicity and the effects of long-term vegetation control on soil microbial communities. *Soil Biology and Biochemistry*, 33(12), 1777-1789. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(01\)00103-1](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(01)00103-1)

Campo Quesada, J. M., Volverás Mambuscay, B., & Amézquita, E. (2016). Indicadores de calidad física del suelo de la zona cerealera andina del departamento de Nariño, Colombia. *Ciencia Y Tecnología Agropecuaria*, 17(3), 361-377. https://doi.org/10.21930/rcta.vol17_num3_art:513

Carretta, L., Cardinali, A., Onofri, A., Masin, R., & Zanin, G. (2021). Dynamics of Glyphosate and Aminomethylphosphonic Acid in Soil Under Conventional and Conservation Tillage. *International Journal of Environmental Research*, 15(6), 1037-1055. <https://doi.org/10.1007/s41742-021-00369-3>

Cubides Guerra, C. (2021). La bioprospección como alternativa para la disminución de la contaminación ambiental producida por agroquímicos: aproximación del estado actual en Colombia

De Antinarcóticos, D. (2020). Modificación del plan de manejo ambiental para el programa de erradicación cultivos ilícitos mediante aspersión aérea policía nacional

De Lima E Silva, C., & Pelosi, C. (2023). Effects of glyphosate on earthworms: From fears to facts. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 20(5-1), 1330–1336. <https://doi.org/10.1002/ieam.4873>

Dotor-Robayo, M. Y., Guerrero-Dallos, J. A., & Martínez-Cordón, M. J. (2022). Influence of monoammonium phosphate on glyphosate adsorption-desorption in tropical soils: Effect of the order of sorbate additions. *Chemosphere* (Oxford), 303(Pt 1). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135030>

Durán Acosta, L. F., & Ladera Hernández, M. J. (2016). Biorremediación de suelos contaminados por organoclorados mediante la estimulación de microorganismos autóctonos, utilizando biosólidos. *Nexo Revista Científica*, 29(1), 22-28. <https://doi.org/10.5377/nexo.v29i01.4397>

Environmental Justice Atlas. (2024). Restarting of aerial fumigation of illicit crops in Nariño, Colombia. EJAtlas. <https://ejatlas.org/conflict/restarting-of-aerial-fumigation-of-illicit-crops-in-narino-colombia>

Ermakova, I. T., Kiseleva, N. I., Shushkova, T., Zharikov, M., Zharikov, G. A., & Leontievsky, A. A. (2010). Bioremediation of glyphosate-contaminated soils. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 88(2), 585-594. <https://doi.org/10.1007/s00253-010-2775-0>

Fan, J., Yang, G., Zhao, H., Shi, G., Geng, Y., Hou, T., & Tao, K. (2012). Isolation, identification and characterization of a glyphosate-degrading bacterium, *Bacillus cereus* CB4, from soil. *Journal of General and Applied Microbiology*, 58(4), 263-271. <https://doi.org/10.2323/jgam.58.263>

FAO. (2020). Plan de desarrollo agropecuario y rural con enfoque territorial departamento de Nariño.

FEDEPAPA, & Fondo Nacional del Fomento de la Papa. (2023). *Boletín Regional Nariño*, 7(1), 2-25.

Gao, W., Zhang, Y., Lin, M., Mao, J., Xing, B., Li, Y., & Hou, R. (2023). Capability of phytoremediation of glyphosate in environment by *Vulpia myuros*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 265, 115511. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115511>

Gaupp-Berghausen, M., Hofer, M., Rewald, B., & Zaller, J. G. (2015). Glyphosate-based herbicides reduce the activity and reproduction of earthworms and lead to increased soil nutrient concentrations. *Scientific Reports*, 5(1), 12886. <https://doi.org/10.1038/srep12886>

Gaviria Melo, S., Fierro Morales, J., Sorzano López, C., Guío Blanco, C. M., Quintero Chavarría, E., Alvarado, L., González, H., Numpaque, M., & León, J. (2020). Evaluación independiente del plan de manejo ambiental general (PMAG) modificado para el programa de erradicación de cultivos ilícitos por aspersión aérea (PECIG).

Gómez Ortiz, A. M., Okada, E., Bedmar, F., & Costa, J. L. (2017). Sorption and desorption of glyphosate in Mollisols and Ultisols soils of Argentina. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 36(10), 2587-2592. <https://doi.org/10.1002/etc.3851>

Gomez Velandia, A. Y. (2022). Alternativas de solución para la afectación ambiental por el uso del glifosato en Colombia. Bogotá D.C: Universidad Antonio Nariño.

González, O., & Martínez, C. (2022). El debate sobre el glifosato en Colombia: controversia científico-tecnológica y ciencia regulativa. *Revista Iberoamericana De Ciencia, Tecnología Y Sociedad: Cts*, 17(49), 11. <https://search.proquest.com/docview/2644440386>

Guijarro, K. H., Aparicio, V., De Gerónimo, E., Castellote, M., Figuerola, E. L., Costa, J. L., & Erijman, L. (2018). Soil microbial communities and glyphosate decay in soils with different herbicide application history. *The Science of the Total Environment*, 634, 974-982. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.393>

Hadi, F., Mousavi, A., Noghabi, K. A., Tabar, H. G., & Salmanian, A. H. (2013). New bacterial strain of the genus *Ochrobactrum* with glyphosate-degrading activity. *Journal of Environmental Science and Health. Part B, Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes*, 48(3), 208-213. <https://doi.org/10.1080/03601234.2013.730319>

Hernández, M., Torres, A., & Delgado, J. (2024). Unlocking the potential of soil microbial communities for bioremediation of pesticide-contaminated environments. *Frontiers in Microbiology*, 15, 11271216. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.11271216>

Ibrahim, N. E., Sevakumaran, V., & Ariffin, F. (2023). Preliminary study on glyphosate-degrading bacteria isolated from agricultural soil. *Environmental Advances*, 12, 100368. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100368>

IGAC. (2004). Estudio General de suelos y zonificación de tierras del departamento de Nariño.

IGAC. (2015). Mapa de suelos en Colombia a nivel de Orden. Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC - Subdirección de Agrología - Grupo Interno de trabajo Levantamiento de suelos. <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-agrologia>

Kulikova, N. A., Zhelezova, A. D., Voropanov, M. G., Filippova, O. I., Plyushchenko, I. V., & Rodin, I. A. (2020). Monoammonium Phosphate Effects on Glyphosate in Soils: Mobilization, Phytotoxicity, and Alteration of the Microbial Community. *Eurasian Soil Science*, 53(6), 787-797. <https://doi.org/10.1134/S106422932006006X>

Kumar, P., Singh, R., & Patel, A. (2024). Investigation of bioremediation for glyphosate and its metabolites using molecular modeling approaches. *Journal of Biomolecular Structure and Dynamics*, 42(5), 1123–1135. <https://doi.org/10.1080/07391102.2024.2445767>

Kunanbayev, K., Churkina, G., Rukavitsina, I., Filippova, N., & Utebayev, M. (2019). Potential Attractiveness of Soil Fungus *Trichoderma inhamatum* for Biodegradation of the Glyphosate Herbicide. *Journal of Ecological Engineering*, 20(11), 240-245. <https://doi.org/10.12911/22998993/113580>

Lancaster, S. H., Hollister, E. B., Senseman, S. A., & Gentry, T. J. (2010). Effects of repeated glyphosate applications on soil microbial community composition and the mineralization of glyphosate. *Pest Management Science*, 66(1), 59-64. <https://doi.org/10.1002/ps.1831>

Lane, M., Lorenz, N., Saxena, J., Ramsier, C., & Dick, R. P. (2012). The effect of glyphosate on soil microbial activity, microbial community structure, and soil potassium. *Pedobiologia*, 55(6), 335-342. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2012.08.001>

Lerbs, W., Stock, M., & Parthier, B. (1990). Physiological aspects of glyphosate degradation in *Alcaligenes* spec. strain GL. *Archives of Microbiology*, 153(2), 146-150. <https://doi.org/10.1007/BF00247812>

Liu, C. M., McLean, P. A., Sookdeo, C. C., & Cannon, F. C. (1991). Degradation of the herbicide glyphosate by members of the family Rhizobiaceae. *Applied and Environmental Microbiology*, 57(6), 1799-1804. <https://doi.org/10.1128/aem.57.6.1799-1804.1991>

López-Chávez, M. Y., Alvarez-Legorreta, T., Infante-Mata, D., Dunn, M. F., & Guillén-Navarro, K. (2021). Glyphosate-remediation potential of selected plant species in artificial wetlands. *The Science of the Total Environment*, 781, 146812. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146812>

Mejía, D. (2017). Plan Colombia: An Analysis of Effectiveness and Costs. Foreign Policy at BROOKINGS, 1-17. <http://www.brookings.edu>

Méndez, F., & Zapata-Rivera, A. M. (2021). Conflicto armado, contaminación y riesgos en salud: una evaluación de riesgo de tres fuentes de exposición ambiental asociadas con el conflicto en Colombia. *Biomédica*, 41(4), 660-675. <https://doi.org/10.7705/biomedica.5928>

Ministerio de Justicia y del Derecho - Observatorio de Drogas de Colombia. (2020). Atlas de la Caracterización Regional de la problemática asociada a las drogas ilícitas en el departamento de Nariño. Colombia: minjusticia.gov.co/programas-co/ODC/Documents/Territorios/CaracterizacionRegional/REATLAS0639_narino.pdf

Mohy-Ud-Din, W., Akhtar, M. J., Bashir, S., Asghar, H. N., Nawaz, M. F., & Chen, F. (2023). Isolation of Glyphosate-Resistant Bacterial Strains to Improve the Growth of Maize and Degrade Glyphosate under Axenic Condition. *Agriculture (Basel)*, 13(4), 886. <https://doi.org/10.3390/agriculture13040886>

Müller, T., Schäfer, D., & Klein, R. (2024). Effects of glyphosate on antibiotic resistance in soil bacteria. *Journal of Environmental Quality*, 53(1), 45–57. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20655>

Oliveira, R., Santos, L., & Costa, M. (2024). Effect of the phosphate and mineralogical composition on glyphosate sorption in soils. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 21(2), 3451–3465. <https://doi.org/10.1007/s13762-024-05707-4>

Ortega, E. G., & Ponce, M. H. F. (2022). Dinámica del glifosato en el suelo y sus efectos en la microbiota. *Revista Internacional De Contaminación Ambiental*, 38, 127-144. <https://doi.org/10.20937/RICA.54197>

Pipke, R., & Amrhein, N. (1988). Degradation of the phosphonate herbicide glyphosate by *Arthrobacter atrocyaneus* ATCC 13752. *Applied and Environmental Microbiology*, 54(5), 1293-1296. <https://doi.org/10.1128/aem.54.5.1293-1296.1988>

Rebai, H., Sholkamy, E. N., Alharbi, R. M., Abdel-Raouf, N., Boufercha, O., Castro, P., & Boudemagh, A. (2023). *Streptomyces* sp. Strain SRH22: A Potential Bioremediation Agent for Glyphosate-Contaminated Agricultural Soils. *Warasan Singwaetlom Lae Sappayakon Tammachat*, 21(6), 1-12. <https://doi.org/10.32526/en-nrj/21/20230181>

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2020). Plan Departamental de Extensión Agropecuaria PDEA Nariño 2020-2023.

Singh, S., Kumar, V., Gill, J. P. K., Datta, S., Singh, S., Dhaka, V., Kapoor, D., Wani, A. B., Dhanjal, D. S., Kumar, M., Harikumar, S. L., & Singh, J. (2020). Herbicide Glyphosate: Toxicity and Microbial Degradation. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(20), 7519. <https://doi.org/10.3390/ijerph17207519>

Soto, S. (2019). Estudio Biodegradación Clorpirifós con Lacasa de Hongos Filamentosos y de Pudrición Blanca. *ProQuest Dissertations Publishing*. <https://search.proquest.com/docview/2753682505>

Spinelli, V., Ceci, A., Dal Bosco, C., Gentili, A., & Persiani, A. M. (2021). Glyphosate-Eating Fungi: Study on Fungal Saprotrophic Strains' Ability to Tolerate and Utilise Glyphosate as a Nutritional Source and on the Ability of *Purpureocillium lilacinum* to Degrade It. *Microorganisms (Basel)*, 9(11), 2179. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9112179>

Sviridov, A. V., Shushkova, T. V., Ermakova, I. T., Ivanova, E. V., Epiktetov, D. O., & Leontievsky, A. A. (2015). Microbial degradation of glyphosate herbicides (Review). *Applied Biochemistry and Microbiology*, 51(2), 188-195. <https://doi.org/10.1134/S0003683815020209>

Sviridov, A. V., Shushkova, T. V., Zelenkova, N. F., Vinokurova, N. G., Morgunov, I. G., Ermakova, I. T., & Leontievsky, A. A. (2012). Distribution of glyphosate and methylphosphonate catabolism systems in soil bacteria *Ochrobactrum anthropi* and *Achromobacter* sp. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 93(2), 787-796. <https://doi.org/10.1007/s00253-011-3485-y>

Thieffry, S., Aubert, J., Devers-Lamrani, M., Martin-Laurent, F., Romdhane, S., Rouard, N., Siol, M., & Spor, A. (2024). Engineering multi-degrading bacterial communities to bioremediate soils contaminated with pesticides residues. *Cold Spring Harbor: Cold Spring Harbor Laboratory Press*. z

Tofiño Rivera, A. P., Carbone Murgas, R. E., Melo Ríos, A. E., & Merini, L. J. (2020). Efecto del glifosato sobre la microbiota, calidad del suelo y cultivo de frijol bio-fortificado en el departamento del Cesar, Colombia. *Revista argentina de microbiología*, 52(1), 61-71. <https://dx.doi.org/10.1016/j.ram.2019.01.006>

UNODC. (2023). Monitoreo de los territorios con presencia de cultivos de coca 2022. https://www.unodc.org/documents/crop-monitoring/Colombia/Colombia_Monitoreo_2022.pdf

Vodouhe, F. G., & Khasa, D. P. (2015). Local Community Perceptions of Mine Site Restoration Using Phytoremediation in Abitibi-Temiscamingue (Quebec). *International Journal of Phytoremediation*, 17(10), 962-972. <https://doi.org/10.1080/15226514.2014.981238>

Zabaloy, M. C., Allegrini, M., Hernandez Guijarro, K., Behrends Kraemer, F., Morrás, H., & Erijman, L. (2022). Microbiomes and glyphosate biodegradation in edaphic and aquatic environments: recent issues and trends. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 38(6), 98. <https://doi.org/10.1007/s11274-022-03281-w>

Zhan, H., Feng, Y., Fan, X., & Chen, S. (2018). Recent advances in glyphosate biodegradation. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 102(12), 5033-5043. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9035-0>

Zhang, Y., Li, H., Chen, S., & Wang, J. (2024). Complete biodegradation of glyphosate with microbial consortia. *Environmental Advances*, 16, 100497. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2024.100497>

Zhao, H., Tao, K., Zhu, J., Liu, S., Gao, H., & Zhou, X. (2015). Bioremediation potential of glyphosate-degrading *Pseudomonas* spp. strains isolated from contaminated soil. *Journal of General and Applied Microbiology*, 61(5), 165-170. <https://doi.org/10.2323/jgam.61.165>

Zuñiga, F., Burbano Orjuela, H., Sarasty, J., Guerrero, G., Huertas, J., & Dörner, J. (2018). Propiedades morfológicas de los suelos asociadas a los ecosistemas de Páramo, Nariño, Sur de Colombia. *Terra Latinoamericana*, 36(2), 184-194. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i2.363>