



Universidad **Mariana**

Remediación de suelos degradados con herbicida glifosato a partir del abono orgánico
mineralizado de estiércol de cabra

Juan David Acosta Morales

Gicela Lucia Ramos Díaz

Universidad Mariana
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Ambiental
San Juan de Pasto

2024

Remediación de suelos degradados con herbicida glifosato a partir del abono orgánico
mineralizado de estiércol de cabra

Juan David Acosta Morales

Gicela Lucia Ramos Díaz

Informe de investigación para optar al título de: Ingenieros Ambientales

Mg. Jenny Lucia Huertas Delgado

Asesora

Universidad Mariana
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Ambiental
San Juan de Pasto

2024

Artículo 71: los conceptos, afirmaciones y opiniones emitidos en el Trabajo de Grado son responsabilidad única y exclusiva del (los) Educando (s)

Reglamento de Investigaciones y Publicaciones, 2007

Universidad Mariana

Agradecimientos

En el camino que nos ha llevado a terminar este trabajo investigativo, solo podemos expresar nuestra profunda gratitud a quienes fueron fundamentales en la culminación de esta meta.

En primer lugar, agradecemos a Dios, por ser fuente de sabiduría y guía en este camino académico y personal, por otorgarnos la fortaleza y perseverancia para cumplir con uno de nuestros sueños y dar por culminada esta maravillosa etapa universitaria.

A la Institución Universidad Mariana, por brindarnos la oportunidad de adquirir conocimiento y habilidades, y por ofrecernos un espacio de crecimiento intelectual que ha hecho posible la realización de esta investigación.

Por último, a nuestra asesora, la Mg. Jenny Lucia Huertas Delgado, le agradecemos por su invaluable orientación, apoyo y consejos a lo largo de este proceso, su guía y experiencia fueron fundamentales para dar forma a nuestro trabajo y alcanzar los estándares de calidad que hoy presentamos. Muchas gracias.

Dedicatoria

A Dios, quien ha sido mi guía en todo este proceso, que me ha dado la fortaleza para alcanzar los logros en el transcurso de este caminar.

A mi madre Clara y mi hermano Jaime, que con su amor y su esfuerzo me han permitido culminar este logro, les agradezco por ser mi motor, mis guías y mis mayores inspiraciones, por enseñarme a no rendirme y a superar cualquier obstáculo.

A mi tío Ever y mi tía Carmelina que han sido un pilar invaluable en mi vida, brindándome su apoyo inquebrantable en cada paso de mi camino, sus consejos llenos de sabiduría y sus palabras de aliento, especialmente en los momentos más difíciles, me ha impulsado a seguir adelante con fuerza y confianza.

Gicela Lucia Ramos Díaz

Dedicatoria

A Dios por llenarme de sabiduría y haber hecho realidad uno de mis sueños, terminar una de las mejores etapas de mi vida significa mucho para mí.

A mi madre Luz Marina, por ser esa mujer que sacrifica todo por su hijo, te prometo que todo será recompensado, gracias por ser el motor que impulsa mi vida, mi ejemplo a seguir y esa mano amiga que siempre ha estado para mí, eres uno de los grandes motivos que hoy me permiten alcanzar esta meta, este logro es para ti mamá. “Te amo demasiado mi mejor”

A mis abuelos María y Segundo por brindarme esa sabiduría y ese amor incondicional en el hogar y permitirme ver que todo problema tiene solución, y que todo sacrificio tiene su recompensa. “Les agradezco de corazón”

A mis tíos Jaime, Yonny, Yobanny y Diego por brindarme ese apoyo incondicional y ese amor paternal en mi vida que me ha formado y me hacen sentir orgulloso de quién soy. “Este logro es para ustedes”

A mis compañeros, amigos y personas, que en este trayecto aportaron su granito de arena para culminar esta etapa, gracias por su apoyo y ánimo incondicional. “Los llevo en el corazón”

Juan David Acosta Morales

Contenido

Introducción	11
1. Resumen del proyecto	13
1.1. Descripción del problema.....	13
1.1.1. Formulación del problema	14
1.1.2. Hipótesis.....	14
1.2. Justificación.....	15
1.3. Objetivos	16
1.3.1. Objetivo general	16
1.3.2. Objetivos específicos.....	16
1.4. Antecedentes	16
1.5. Materiales y métodos	19
1.5.1. Área de estudio.....	19
1.5.2. Descripción de metodologías	21
1.5.2.1. Objetivo específico 1.....	21
1.5.2.2. Objetivo específico 2.....	21
1.5.2.3. Objetivo específico 3.....	22
1.5.3. Diseño experimental.....	22
1.5.4. Línea de investigación y área temática	23
2. Presentación de resultados	24
2.1. Análisis y discusión del primer objetivo	24
2.2. Análisis y discusión del segundo objetivo	27
2.3. Análisis y discusión del tercer objetivo.....	37
3. Conclusiones	44
4. Recomendaciones.....	45
Referencias bibliográficas	46
Anexos.....	55

Índice de Tablas

Tabla 1. Características climatológicas y ubicación geográfica	20
Tabla 2. Métodos para análisis fisicoquímico de suelos y los métodos de medición	21
Tabla 3. Caracterización del perfil de suelo en campo	24
Tabla 4. Rangos pH.....	28
Tabla 5. Rango MO	34
Tabla 6. Rangos CIC	36
Tabla 7. Condiciones cromatográficas	37
Tabla 8. Tiempo muestreo.....	38
Tabla 9. Resultados obtenidos con la técnica de HPLC en los tres tratamientos.....	39
Tabla 10. Resultados AMPA cromatografía por el método HPCL.....	41

Índice de Figuras

Figura 1. Mapa base de ubicación de zona de estudio, Corregimiento de Catambuco, Nariño	20
Figura 2. Diseño experimental	22
Figura 3. Determinación de pH	27
Figura 4. Determinación de conductividad eléctrica.....	29
Figura 5. Determinación de humedad	30
Figura 6 Determinación de densidad aparente	32
Figura 7. Determinación de materia orgánica	34
Figura 8. Determinación de capacidad de intercambio catiónico	35
Figura 9. Curva de calibración área/concentración	38
Figura 10. Grafica de relación entre concentración y remoción de glifosato	40
Figura 11. Concentración y porcentaje de AMPA (ácido aminometilfosfónico)	42

Índice de Anexos

Anexo A. Cromatograma suelo control.....	55
Anexo B. Cromatograma suelo contaminado	55
Anexo C. Cromatograma suelo remediado	56

Introducción

El suelo es uno de los recursos más importantes considerados para la vida, por lo que un suelo contaminado o que ha sufrido un cambio en sus características físicas, químicas o biológicas, podría resultar incompatible con sus propiedades funcionales de uso en cuanto al desarrollo ecológico (Escobar, 2022). Además, supondría una amenaza grave para la salud de los seres vivos y el ambiente en donde se desarrolla, puesto que le brinda a las especies vegetales y animales un espacio para su subsistencia y, de manera directa, un beneficio a los humanos. Por lo tanto, la alteración del suelo debido a la incorporación antropogénica de sustancias ajenas, es uno de los temas de estudio con más énfasis en la actualidad por los diferentes problemas ambientales y la amenaza real a la salud pública que ha causado, entre los agentes contaminantes que impactan negativamente al suelo están los herbicidas, fungicidas y plaguicidas (Escobar, 2022).

Un ejemplo de los herbicidas es el glifosato, actuando como un agente reductor de cultivos impidiendo el crecimiento y desarrollo de las especies vegetales y animales, tanto de forma micro como macroscópica, cuya efectividad se ha ratificado mediante los procesos de erradicación de cultivos ilícitos en diversos países (Escobar, 2022).

El uso indiscriminado del glifosato puede provocar cambios en las propiedades fisicoquímicas del suelo, degradando su estructura y disminuyendo su capacidad de retención de agua y nutrientes (Arreguin, 2015), afectando así la estructura al disminuir la actividad de microorganismos formadores de agregados, lo que conlleva a la compactación, reducción de porosidad y aireación del mismo. Por otro lado, este herbicida puede inmovilizar nutrientes, alterando su disponibilidad para las plantas, además de modificar el pH y la capacidad de intercambio catiónico, impactando negativamente en la fertilidad y el desarrollo óptimo de los cultivos o vegetación.

Actualmente, existen diversas técnicas de remediación de suelos como las enmiendas orgánicas. Murillo et al. (2020) afirman que las enmiendas orgánicas son el resultado de la composta (degradación u oxidación) “de materiales de origen animal o vegetal y tienen la capacidad de reducir los productos químicos que son agregados al suelo, además tienen como objetivo estimular la vida microbiana y la nutrición de las plantas” (p. 61), y que estas varían en su composición

química de acuerdo con el proceso de elaboración, duración del proceso, actividad biológica y tipos de materiales que se utilicen, con la finalidad de evaluar la recuperación de las propiedades fisicoquímicas del suelo a escala laboratorio y de la misma manera lograr disminuir los costos de la propuesta.

La presente investigación se basa en el estudio del abono orgánico mineralizado de cabra como enmienda orgánica para la remediación de suelos contaminados por la fumigación implementando el uso de herbicidas como lo es el glifosato y así encontrar cómo este se comporta para el beneficio del suelo para este tipo de casos. Para ello, se planteó extraer muestras de un suelo correspondiente a una zona de estudio específica de un suelo andisol, en inmediaciones del corregimiento de Catambuco, con ello, se realizó un proceso de contaminación controlada adicionando glifosato a las muestras de suelo recolectadas, seguido a esto, se incorpora la enmienda orgánica, en donde este proceso se realiza para determinar cómo este tipo de enmienda orgánica obtiene mejor rendimiento respecto a la restauración de las muestras contaminadas.

1. Resumen del proyecto

El documento titulado *remediación de suelos degradados con herbicida glifosato a partir de abono orgánico mineralizado de estiércol de cabra*, presenta un estudio sobre la aplicación de abono orgánico mineralizado en la recuperación de parámetros fisicoquímicos en suelos contaminados por glifosato. En el departamento de Nariño existe la siembra de varios cultivos ilícitos que van en contra de la ley, lo cual ha llevado al gobierno a tomar medidas para la exterminación de estos cultivos mediante el uso de glifosato, este herbicida afecta demasiado la estructura fisicoquímica del suelo, por ende esta investigación se centra en la remediación de suelos afectados por esta práctica.

Para obtener los resultados, se realizó la caracterización del suelo por medio de una calicata, donde se evaluó sus diferentes horizontes y se determinó sus características, como se detalla en la tabla 1. Además, se llevó a cabo un muestreo en zig-zag para obtener muestras representativas del terreno, las cuales fueron analizadas en laboratorio con diferentes tratamientos teniendo un suelo control (SC), un suelo glifosato (SG) y un suelo remediado (SR). Así mismo, se tuvo en cuenta tiempos determinados para analizar los parámetros fisicoquímicos y su evolución en cada uno de los muestreos, con el fin de evaluar la eficiencia de remediación del suelo.

Los resultados muestran que esta enmienda orgánica mejora las propiedades físico-químicas del suelo, como su estructura, su porosidad y compactación del mismo, beneficiando así a la conductividad eléctrica, la capacidad de intercambio catiónico y la disminución de densidad aparente. También ayuda a la neutralización del pH, aporta nutrientes aumentando la materia orgánica lo que promueve el crecimiento de las plantas y la recuperación del ecosistema afectado. Sin embargo, se requiere más investigación para evaluar su efectividad en condiciones reales y considerar la persistencia del glifosato a largo plazo.

1.1. Descripción del problema

En Nariño, las zonas rurales enfrentan una serie de desafíos basados en la pobreza, la falta de presencia del estado ha dejado a estas comunidades marginadas y con dificultades para acceder a

servicios básicos y programas de desarrollo, esta situación se agrava por la presencia de cultivos ilícitos, como los de coca, que representan una fuente de ingresos para muchos habitantes pero también contribuyen a la inestabilidad y al deterioro de las condiciones de vida según la Oficina de Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC, 2019)

El programa de erradicación de cultivos ilícitos practicado en Colombia, se desarrolló pensando en detener el cultivo ilícito en dichas zonas, la actividad del glifosato en el suelo consiste en la neutralización de organismos microbiológicos y pérdida de condiciones naturales físicas y químicas, como variación de textura, color, porosidad, potencial de hidrogeno, capacidad de intercambio catiónico, porcentaje de materia orgánica, entre otras (Navarro et al., 2007).

Teniendo en cuenta que Nariño ocupa el segundo puesto en producción de coca en Colombia, cuyos cultivos equivalen al 24% de lo que se siembra en el país, con un total aproximado de 37 mil hectáreas en 2019 (Revista Semana, 2021), el programa de radicación que implementó el gobierno para controlar esta problemática dio pie al uso de fumigación con glifosato, sin medir las consecuencias que este peligroso herbicida puede generar en el suelo, ante esta situación, es fundamental buscar alternativas que permitan restaurar los suelos afectados por el glifosato. Una opción prometedora es el uso de enmiendas orgánicas a escala de laboratorio ya que ayudan a restablecer parcial o totalmente las condiciones originales del suelo, promoviendo la recuperación de la microbiota y mejorando su estructura física y química (Cañero, 2013).

1.1.1. Formulación del problema

¿Cuál es el efecto del abono orgánico mineralizado a partir del estiércol de cabra en la recuperación de suelo contaminado con glifosato?

1.1.2. Hipótesis

La aplicación de abono orgánico mineralizado de estiércol de cabra tiene efecto positivo de restauración sobre las propiedades fisicoquímicas como la densidad aparente, así como también el

pH, la conductividad eléctrica, porcentaje de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico y humedad del suelo contaminado por glifosato a escala de laboratorio.

1.2. Justificación

La investigación se enfoca en la remediación del suelo después de la aplicación de glifosato, fundamentada en la preocupación que se generan de acuerdo a los efectos negativos que tiene el uso de este herbicida, incluyendo la contaminación del suelo y su degradación tanto física, química y biológica, afectando así a los ecosistemas, biodiversidad, contaminación del agua y pérdida de productividad agrícola del suelo (Pinedo y Sandoval, 2020).

La remediación a partir de estiércol mineralizado busca el beneficio de las poblaciones agricultoras y la protección del suelo, teniendo en cuenta que este es fundamental en el equilibrio ecológico, dando a conocer con esta investigación como se ve afectado el suelo por el uso de estos herbicidas y una estrategia de remediación para restaurar sus parámetros físicos y químicos, como también mitigar los posibles impactos ambientales relacionados con el suelo (Farinango y López, 2022).

Una solución prometedora para remediar los suelos degradados por el glifosato es la aplicación de estiércol de cabra como enmienda orgánica, además de aprovechar este residuo orgánico, el estiércol de cabra, gracias a su alto contenido de nutrientes y materia orgánica estabilizada, puede mejorar notablemente las propiedades fisicoquímicas como: Materia orgánica (2 – 6%), capacidad de intercambio catiónico (10 – 30 meq/100g), pH (6 – 7.5) y biológicas de los suelos (Mendieta, 2020). Este desecho ganadero rico en nutrientes y materia orgánica puede mejorar las propiedades físicas y químicas del suelo. A nivel físico, promueve la formación de agregados estables, aumentando la porosidad y aireación. En cuanto a las propiedades químicas, aporta nutrientes esenciales y mejora la capacidad de intercambio catiónico, facilitando su disponibilidad para las plantas. Además, el estiércol de cabra estimula la actividad microbiana benéfica del suelo, contribuyendo a su remediación biológica.

Se considera importante realizar la investigación debido a que la contaminación del suelo genera graves impactos ambientales y socioeconómicos, ya que el suelo se considera un servicio ecosistémico que proporciona de manera directa e indirecta, el más importante es el de apoyo y provisión de ahí que, los seres vivos tengan un lugar en donde vivir y tengan alimento, por lo tanto, repercuten en las poblaciones aledañas, además que la degradación del suelo y el uso de herbicidas tiene consecuencias a largo plazo para la salud humana, al abordar esta problemática se busca contribuir a la protección y preservación de recursos naturales, la salud pública y la sostenibilidad de la agricultura (Burbano, 2016).

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar la remediación de suelos contaminados por glifosato al aplicar abono orgánico mineralizado de cabra.

1.3.2. Objetivos específicos

- Caracterizar las propiedades iniciales mediante la identificación de perfiles de suelo en el área de estudio.
- Analizar el impacto del abono orgánico mineralizado de cabra sobre las propiedades físicas y químicas del suelo contaminado por glifosato a partir de un diseño de experimentos.
- Determinar la concentración de glifosato presente en el suelo en los diferentes tratamientos evaluados.

1.4. Antecedentes

El glifosato es un herbicida sistémico que actúa en post-emergencia, no selectivo, de amplio espectro, usado para matar plantas no deseadas como pastos anuales y perennes, hierbas de hoja ancha y especies leñosas por otra parte es un ácido, pero es comúnmente usado en forma de

sales, más comúnmente la sal isopropilamina de glifosato, o sal isopropilamina de N-(fosfonometil) glicina. (Nivia, 2000, p. 1)

Su popularidad ha aumentado considerablemente debido a su eficacia en la eliminación de malezas no deseadas en diversos cultivos, sin embargo, su uso ha generado preocupación debido a su potencial toxicidad y sus efectos en los ecosistemas circundantes.

De acuerdo a Quintero (2020), el impacto del glifosato en los suelos colombianos ha sido un tema de interés constante en la comunidad científica durante los últimos años. Desde una perspectiva general, diversos estudios han abordado cómo este herbicida afecta las comunidades fúngicas y las propiedades fisicoquímicas de los suelos, así como las posibles soluciones para mitigar su impacto ambiental.

En este sentido, Fernández (2014) estudió la comparación de las comunidades fúngicas en suelos con y sin exposición previa a glifosato buscando evaluar la capacidad de los hongos filamentosos para recuperar suelos contaminados con este herbicida. Asimismo, es fundamental evaluar las propiedades fisicoquímicas del suelo, ya que la aplicación de glifosato deja trazas de contaminantes, especialmente de metales pesados, por lo tanto, se realizó el análisis fisicoquímico del área contaminada para evidenciar los cambios significativos en las condiciones del suelo (Chasquero, 2022).

Uno de los principales problemas asociados con el glifosato es su persistencia en el suelo y el agua, según estudios realizados el glifosato puede permanecer en el suelo durante períodos prolongados, lo que aumenta el riesgo de contaminación a largo plazo, esto plantea preocupaciones sobre la posible acumulación del herbicida en el medio ambiente y su impacto en la calidad del suelo y los recursos hídricos (Regnicoli, 2017).

Así mismo, Cortés y Moná (2019) , examinaron los impactos ambientales del glifosato en Colombia, destacando su uso como herbicida sistémico no selectivo y su efecto en diversos sistemas agrícolas. Esta investigación contribuyó significativamente al entendimiento de los efectos del glifosato en el medio ambiente colombiano, en la degradación del medio ambiente

como: efectos en la flora, fauna, ecosistemas acuáticos y el ecosistema terrestre, de tal manera se presentó que un 49% no reporta un impacto significativo en la salud, mientras que el 48% si están presentes efectos hacia la salud (Duarte, 2003).

En el estudio llevado a cabo por Gómez (2022) en el municipio de Pasto, Nariño, se buscó proponer alternativas para mitigar el impacto ambiental del glifosato en Colombia, centrándose en las áreas de agua, suelo y aire. Según sus hallazgos, en suelo, el glifosato puede persistir hasta 49 días, siendo el proceso de adsorción el principal regulador de propiedades químicas como el pH, este fenómeno se relaciona con la liberación de óxidos de hierro y aluminio, los cuales actúan como protectores del glifosato al dificultar su degradación.

Por otro lado, Muñoz (2021) también analizó los usos actuales del herbicida y su impacto en las poblaciones. En su investigación, no solo identificó los efectos negativos del glifosato, sino que también propuso soluciones específicas basadas en los aspectos vinculados a su aplicación.

Otro aspecto preocupante es el potencial impacto del glifosato en la salud humana, aunque existen controversias sobre este tema, estudios epidemiológicos han sugerido posibles vínculos entre la exposición al glifosato y enfermedades como el cáncer y trastornos reproductivos (Beldomenico, 2021). Estos hallazgos han llevado a un debate continuo sobre la seguridad del glifosato y han generado llamados para una mayor regulación y restricciones en su uso.

En búsqueda de soluciones para la problemática descrita anteriormente, se adelantan diversas investigaciones relacionadas con la remediación de los suelos contaminados con glifosato; es así como Abahonza et al. (2022) en su investigación, evaluó el proceso de la remediación de suelos contaminados con diferentes enmiendas orgánicas como abono orgánico a base de estiércol de cuy, biosólidos a partir de lodos provenientes de una planta de tratamiento de aguas residuales y vermicompost que es un proceso de (bio-oxidación y estabilización de la MO por la acción combinada de lombrices), en cada uno de los parámetros fisicoquímicos, para evaluar la eficiencia de las diferentes enmiendas que se utilizaron en el suelo contaminado con este herbicida, como resultado el abono orgánico fue el mejor método de remediación, debido a que mejoro la estructura

del suelo, aumentando la materia orgánica (7.43 - 14%), capacidad de intercambio catiónico (3.07-82meq/100g) y pH (5.6 – 7).

Analizando así la eficacia de esta en la restauración del suelo, proporcionando fundamentos teóricos importantes para comprender mejor el proceso de remediación y la evolución de los suelos contaminados con glifosato.

En conclusión, el glifosato representa un desafío significativo para la salud humana y el medio ambiente. Si bien su eficacia como herbicida es innegable, es crucial abordar sus efectos adversos y trabajar hacia soluciones que minimicen su impacto en los ecosistemas y la salud pública. Esto requiere un enfoque integral que involucra a científicos, agricultores, formuladores de políticas y la sociedad en su conjunto para encontrar alternativas seguras y sostenibles para el manejo de malezas en la agricultura moderna.

1.5. Materiales y métodos

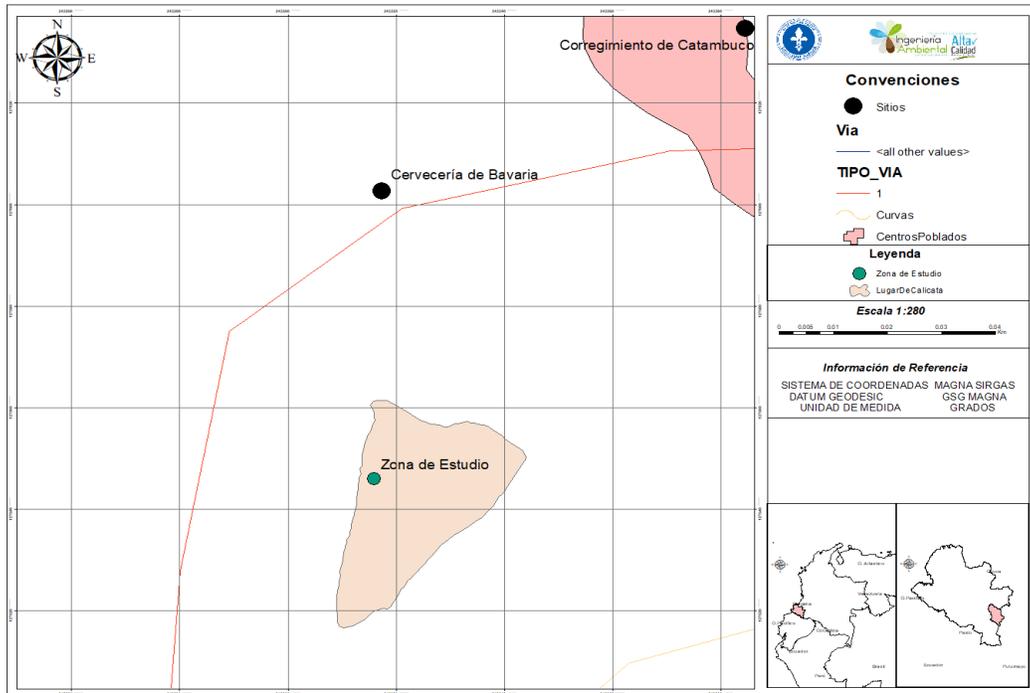
1.5.1. Área de estudio

El lugar de muestreo se encuentra en el corregimiento de Catambuco Figura 1, perteneciente al municipio de Pasto, capital del departamento de Nariño, en el suroccidente de Colombia, el lugar está ubicado en la región Andina, cerca del volcán Galeras, este lugar tiene un clima ecuatorial de montaña, con una temperatura promedio de 14°C y una precipitación anual de 800 mm, (Alcaldía Municipal de Pasto, 2013)

Según Moscoso et al. (2019) el lugar pertenece al bioma de bosque andino, que se caracteriza por una gran diversidad de especies vegetales y animales adaptadas a las condiciones climáticas y topográficas.

Figura 1

Mapa base de ubicación de zona de estudio, Corregimiento de Catambuco, Nariño



Fuente: Colombia Mapas (2023)

En el lugar estudiado se realizaron mediciones de las características básicas ambientales, las cuales se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1

Características climatológicas y ubicación geográfica

Día de Muestreo	Altitud (m.s.n.m)	Temperatura (°C)	Precipitación (mm)	Velocidad del viento (Km/h)	Ubicación geográfica
3/03/24	2943	18	800	18	N01°09'11.0" W077°18'23.8"

1.5.2. Descripción de metodologías

1.5.2.1. Objetivo específico 1. Se utilizó una metodología que involucra la identificación de perfiles del suelo en el área de estudio mediante una calicata de 1 metro por 1 metro, determinando las características del suelo, como textura, plasticidad y, siguiendo la guía Rasta (Álvarez et al., 2010).

Además, se utilizó la tabla de Colores Munsell para estandarizar la cuantificación y comparación del color del suelo, lo que permitió una descripción precisa y uniforme del color en cada uno de los horizontes (Soil Survey Manual, 1993).

1.5.2.2. Objetivo específico 2. Este proceso de remediación involucra la aplicación de métodos físicos y químicos para evaluar diferentes parámetros del suelo a escala de laboratorio, obteniendo información crucial sobre su composición y estructura, estos análisis permiten determinar el comportamiento del suelo para actividades como cultivo, conservación o remediación, los parámetros medidos fueron pH, conductividad eléctrica, densidad aparente y capacidad de intercambio catiónico (Weil y Brady, 2017). Los análisis fisicoquímicos que se realizaron se describen en la Tabla 2.

Tabla 2

Métodos para análisis fisicoquímico de suelos y los métodos de medición

Parámetro	Método de Medición	Ecuación
pH	Potenciómetro	$pH = -\log AH^+$
Conductividad eléctrica	Conductímetro	$AH^+ = \text{actividad ionica de } H^+$
Humedad	Gravimétrico	$\% \text{ Humedad} = \frac{a - b}{a - c} \times 100$
Densidad aparente	Método de la probeta	$Db = pvs - \frac{pv}{pw}$
Materia orgánica	Pérdida por calcinación	$\% M.O = \frac{a - b}{a - c} \times 100$

Capacidad de intercambio catiónico Acetato de amonio al 1 N a pH 7.0

$$CIC \left(\frac{meq}{100g} \right) = \frac{(V_{geNaOH} - V_{gbNaOH}) \times N \times (100 + W)}{ps}$$

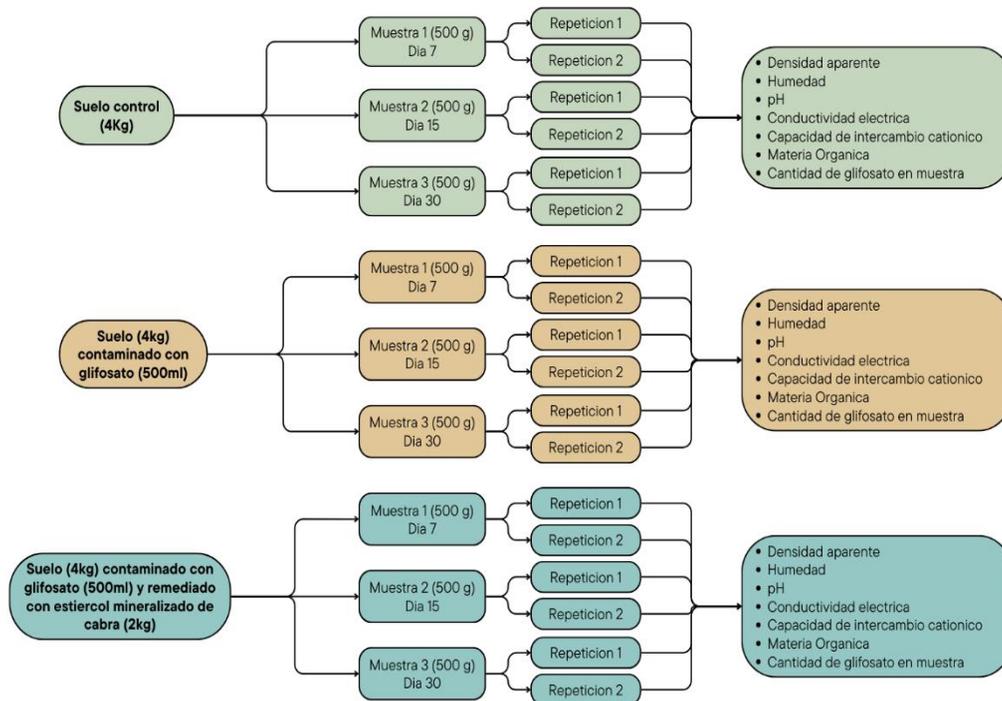
Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2023)

1.5.2.3. Objetivo específico 3. Para medir la concentración de glifosato presente en el suelo se utilizó el método de cromatografía líquida de alta eficiencia (HPLC) a escala de laboratorio, haciendo uso de condiciones cromatográficas, como, temperatura 55 °C y la Columna C18. Para el análisis se inyectaron 10 µL de muestra, y la detección se realizó utilizando detectores UV-vis/RI a una longitud de onda de 195 nm. Estas condiciones cromatográficas garantizaron una separación precisa y eficiente de los componentes analizados, obteniendo cromatogramas (anexo 1, anexo 2, anexo 3) para cada muestreo en tiempos determinados.

1.5.3. Diseño experimental

Figura 2

Diseño experimental



Como se evidencia en la Figura 2, se utilizaron tres macetas diferentes, con diferentes tratamientos, suelo control (SC), suelo glifosato (SG), suelo remediado (SR), cada una con 4 kg de suelo sin ningún tipo de intervención. Inicialmente, se contaminó tanto el SG y SR con 500 mL de glifosato y se dejó en reposo por siete días para que hiciera efecto y actuara sobre el suelo, transcurrido siete días desde la contaminación, se aplicó abono orgánico mineralizado a la maceta (2 kg) R con el fin de remediarla, mientras que la maceta con SG se dejó sin tratamiento alguno, actuando como control contaminado (Sepúl y Velasco, 2002). Por último pasado un tiempo de siete días desde la remediación se iniciaron los respectivos laboratorios con el muestreo 1 (M1) para el análisis de los parámetros fisicoquímicos y la eficiencia de la remediación, cabe destacar que se realizaron dos repeticiones para cada una de las muestras, con el fin de evaluar la evolución del suelo en los tiempos determinados 7 días (M1), 15 días (M2), 30 días (M3).

Por otra parte, se utilizó el software Sigmaplot para llevar a cabo un análisis de ANOVA para determinar las diferencias significativas entre los distintos tratamientos, permitiendo identificar y evaluar las variaciones en los resultados obtenidos, además se realizó la prueba de Tukey, el cual compara las combinaciones de cada periodo y tratamiento de muestreo.

1.5.4. Línea de investigación y área temática

El trabajo maneja una línea de investigación ambiental, fundamentada en la necesidad de abordar los impactos ambientales que genera la contaminación del suelo por herbicidas (glifosato) y la pérdida de las propiedades fisicoquímicas del mismo, enfocándonos en el área investigativa de control de la contaminación, buscando restaurar la matriz del suelo para preservar la salud de los ecosistemas, la disposición de los servicios ecosistémicos y garantizar un entorno saludable para los humanos (Coloma, 2011).

2. Presentación de resultados

2.1. Análisis y discusión del primer objetivo

Para el desarrollo del primer objetivo, se llevó a cabo la caracterización de las propiedades iniciales del suelo, en donde se realizó una calicata de 1 metro de profundidad para identificar los horizontes del suelo. En la Tabla 3, se muestran los resultados obtenidos en campo.

Tabla 3

Caracterización del perfil de suelo en campo

Horizonte	H1	H2	H3	H4	H5	H6
Profundidad (cm)	0-12	12-21	21-45	45-69	69-85	85-100+
Munsell	10YR / 6/6	10YR / 7/8	10YR / 4/4	10YR / 4/4	10YR / 6/6	7.5YR / 3/4
Color						
Color real	Amarillo pardusco	Amarillo	Marrón amarillento oscuro	Marrón amarillento oscuro	Amarillo pardusco	Marrón oscuro
Clase	Franco	Arcillo	Franco	Franco	Franco	Franco
Textural	Arcilloso	Arenoso		Arenoso	arcilloso	arcilloso
Plasticidad	Plástico	Plástico	Plástico	Ligeramente plástico	Plástico	Plástico
Adhesividad	Muy adhesivo	Ligeramente adhesivo	Adhesivo	No adhesivo	Adhesivo	Muy adhesivo

Estructura	Tipo:	Tipo: Bloques	Tipo:	Tipo:	Tipo:	Tipo:
	Bloques angular	angulares	Bloques subangulares	Bloques angulares	Bloques angulares	Bloques subangulares
	Grado:	Moderado	Grado:	Grado:	Grado:	Moderado
	Débil		Moderado	Débil		
Consistencia	Húmedo: Firme	Húmedo: Firme	Húmedo: Friable	Húmedo: Firme	Húmedo: Firme	Húmedo: Firme

Figura 3

Caracterización del perfil de suelo



En la Figura 3, se observa la calicata y se hace la respectiva descripción de los horizontes, dando su respectivo contexto al suelo Andisol que predomina en el área de estudio (Zambrano, 2013).

El perfil del suelo estudiado presentó seis horizontes, tres de ellos clasificados como franco arcillosos, caracterizados por tonos marrones oscuros (10YR 4/4), lo cual es común en suelos con alto contenido de materia orgánica y óxidos de hierro, como los Andisoles (Buol et al., 2011; Schulze et al., 1993). Estos horizontes franco arcillosos (H1, H5 y H6) también mostraron una

consistencia plástica y muy adhesiva, así como estructuras en bloques angulares y subangulares, típicas de suelos con altos contenidos de arcilla (Brady y Weil, 2008; Porta et al., 2003).

El horizonte H6, además de ser franco arcilloso, presentó un tono más rojizo (7.5YR 3/4), lo que sugiere una mayor oxidación y/o un mayor contenido de óxidos de hierro en este horizonte (Bigham y Ciolkosz, 1993; Schulze et al., 1993). Esta variación en el color puede estar relacionada con los procesos de formación del suelo y la deposición de materiales volcánicos a lo largo del tiempo (Dahlgren et al., 2004).

Por otra parte, el horizonte H2 se clasificó como arcillo arenoso, con una combinación de arena y arcilla, pero con predominancia de arena. Esta textura puede influir en propiedades como la aireación, la capacidad de intercambio catiónico y la disponibilidad de nutrientes (Brady y Weil, 2008; Havlin et al., 2005).

Finalmente, los horizontes H3 y H4 se agruparon como francos, con un equilibrio entre las fracciones de arena, limo y arcilla. Esta textura franca proporciona características favorables para la retención de nutrientes, la formación de agregados de buena estructura y la retención de agua (Ramón et al., 2010; Rucks et al., 2004).

El perfil del suelo Andisol, caracterizado por su alta fertilidad, alto contenido de materia orgánica y propiedades físicas y químicas especiales asociadas con materiales volcánicos o cenizas (Narváez et al., 2014). Son comunes en regiones montañosas con climas fríos y templados, dentro de las propiedades físicas y químicas presenta una variación en la textura a lo largo de sus horizontes como franco arcilloso, arcillo arenoso, franco y franco arcilloso lo cual indica una mezcla de partículas de arena, limo y arcilla a lo largo del perfil del suelo, la presencia de horizontes franco arcillosos y arcillo arenosos sugiere que el suelo tiene la capacidad de retener agua y nutrientes, lo que puede ser beneficioso para el crecimiento de las plantas, la textura franco-arcillosa también puede estar relacionada con una alta capacidad de intercambio catiónico (CIC), que influye en la retención y disponibilidad de cationes para las plantas, la presencia de materiales volcánicos o cenizas en el suelo Andisol puede contribuir a su alta fertilidad y contenido de materia orgánica (Ramírez et al., 2022).

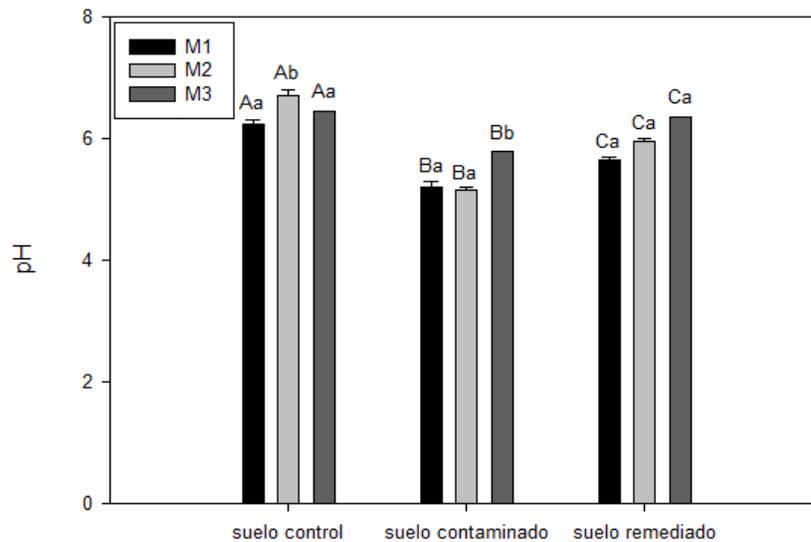
2.2. Análisis y discusión del segundo objetivo

Para el desarrollo del segundo objetivo, se llevó a cabo los respectivos laboratorios para determinar las propiedades físicas y químicas que se describen en la Tabla 2. Los parámetros fisicoquímicos se evaluaron para cada tratamiento en diferentes periodos de muestreo, lo cual nos permitió obtener diferencias significativas entre muestreos y sus respectivos tratamientos.

A continuación, se presenta cada uno de los parámetros fisicoquímicos analizados estadísticamente.

Figura 3

Determinación de pH



Nota. Letras mayúsculas indican diferencias significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos, las letras minúsculas indican diferencias significativas ($p < 0.05$) entre muestreos dentro del mismo tratamiento.

El pH del suelo es una medida de la acidez o alcalinidad de la solución del suelo, que se expresa en una escala de suelo ácido, suelo neutro, suelo básico y suelo alcalino (Brady y Weil, 2008). Esta propiedad química es fundamental, ya que influye directamente en la disponibilidad de nutrientes para las plantas, la actividad microbiana y la estructura del suelo.

La Figura 3, muestra los tres tratamientos: T1 suelo control (SC), T2 suelo contaminado con glifosato (SG) y T3 suelo contaminado y remediado con abono orgánico de estiércol de cabra mineralizado (SR), con sus respectivos muestreos M1 (7días), M2 (15 días) y M3 (30 días), para determinar el pH en cada tratamiento. Los datos se analizaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) de dos vías, seguido de una prueba de Tukey ($p < 0,05$) para comparar las medias.

El análisis estadístico reveló que hubo y no hubo diferencias significativas en el pH entre los tratamientos T1 Y T2 y muestreos M1 Y M2. Sin embargo, se destaca que en el muestreo M3, el pH del tratamiento T3 (suelo remediado) mostró un aumento significativo en comparación con los tratamientos T1 y T2, debido a que la composición del abono tiene materia orgánica, calcio, carbono orgánico total, relación de carbono/nitrógeno y capacidad de intercambio catiónico que interactúa directamente con esta propiedad, ayudando a que el Ph se acerque a valores neutros del (SC). Para interpretar los valores de pH obtenidos, se utilizó la clasificación propuesta por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, 2023) que se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4

Rangos pH

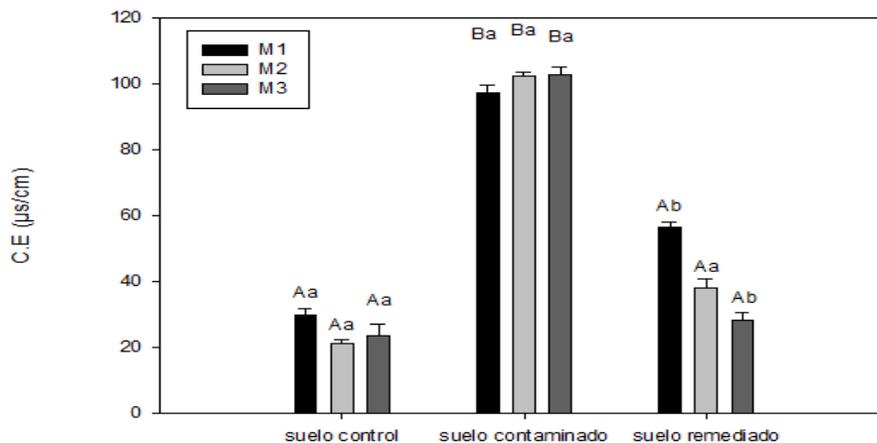
<4,5	Extremadamente ácido
4,5 – 5,5	Fuertemente ácido
5,6 – 6	Medianamente ácido
6,1 – 6,5	Ligeramente ácido
6,6 – 7,3	Neutro
7,4 – 7,8	Medianamente básico
7,9 – 8,4	Básico
8,5 - 9	Ligeramente alcalino
9,1 - 10	Alcalino
>10	Fuertemente Alcalino

Fuente: USDA (2023)

En los muestreos M1 y M2, los tratamientos T1 y T2 se encontraban en un rango de 5,0 a 7,0, clasificando el suelo desde fuertemente ácido hasta neutro. En el muestreo M3, el tratamiento T1 (suelo control) y T3 (suelo remediado) alcanzaron un valor de pH cercano a 6,5, interpretándose como un suelo ligeramente ácido. Estos resultados muestran que la aplicación de abono orgánico de estiércol de cabra mineralizado logra aumentar el pH del SG, acercándolo a un rango de suelo más neutro después de 30 días, lo que concuerda con estudios previos que han demostrado la capacidad del abono orgánico para neutralizar la acidez del suelo y aportar nutrientes esenciales (Aguñaga et al., 2020). Es importante destacar que, si bien el aumento del pH es un indicador positivo, no garantiza una remediación completa de la contaminación por glifosato (Tripathi et al., 2019).

Figura 4

Determinación de conductividad eléctrica



Nota. Letras mayúsculas indican diferencias significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos, las letras minúsculas indican diferencias significativas ($p < 0.05$) entre muestreos dentro del mismo tratamiento.

La conductividad eléctrica (CE) del suelo mide la capacidad del suelo para transmitir una corriente eléctrica, lo cual está directamente relacionado con la cantidad de sales solubles presentes. Una CE elevada indica la presencia de altas concentraciones de sales, lo que puede afectar negativamente el crecimiento de las plantas al dificultar la absorción de agua y nutrientes (Borbor et al., 2006). Según Rengasamy (2006) los valores altos de CE indican alta salinidad, mientras que

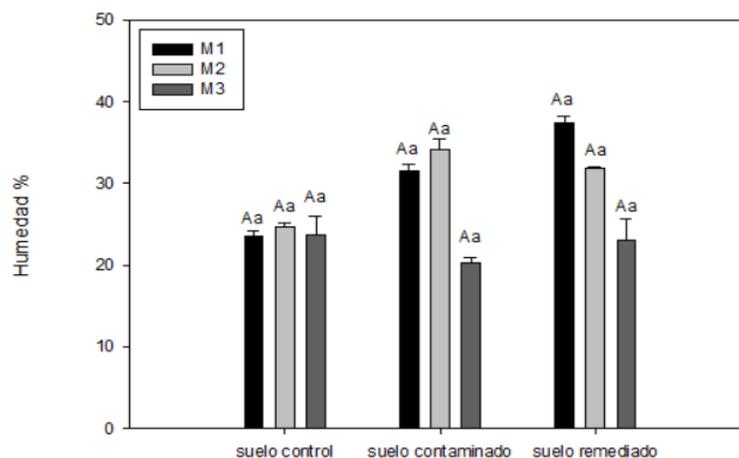
los valores bajos indican baja salinidad. En la gráfica presentada, se observan tres condiciones diferentes del suelo. En primer lugar, el SC presenta valores de CE cercanos a 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo cual se considera un rango de baja salinidad. De acuerdo con Weil y Brady (2017), los suelos no salinos tienen una CE menor a 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Por otro lado, el SG muestra valores de CE superiores a 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que se clasifica como un rango de salinidad moderada a alta. Pérez et al. (2018) mencionan que el glifosato, al contener sales como la glicina, puede aumentar la conductividad eléctrica del suelo debido al incremento en el contenido de sales. Esto se evidencia en los altos valores de CE observados en esta condición.

En cuanto al SR los valores de CE se aproximan a 56 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo cual se encuentra dentro del rango de baja salinidad, similar al SC y por debajo del umbral de 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para suelos no salinos, por otra parte sugieren que el abono orgánico mineralizado de estiércol de cabra utilizado en la remediación puede mejorar las condiciones del suelo al neutralizar la acidez y mejorar la capacidad de retención de agua, lo cual se refleja en los valores de CE cercanos al SC en esta condición (Liang et al., 2003).

Figura 5

Determinación de humedad



Nota. Letras mayúsculas indican diferencias significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos, las letras minúsculas indican diferencias significativas ($p < 0.05$) entre muestreos dentro del mismo tratamiento.

La humedad del suelo es un factor clave que influye directamente en la productividad de los suelos, ya que determina la disponibilidad de agua para las plantas. Además, regula importantes procesos físicos, químicos y biológicos en el suelo, como la aireación, la erosión, la actividad microbiana y la disponibilidad de nutrientes (Jaramillo, 2002).

En la Figura 5 se observa que la humedad del suelo disminuyó con el transcurso del tiempo en los tres tipos de suelos evaluados (SC, SG, SR), siendo esta disminución más evidente después de los 30 días, como lo señalan Doran y Jones (1996) quienes atribuyen esta reducción al método gravimétrico empleado, el cual implica someter las muestras de suelo a secado durante un tiempo establecido.

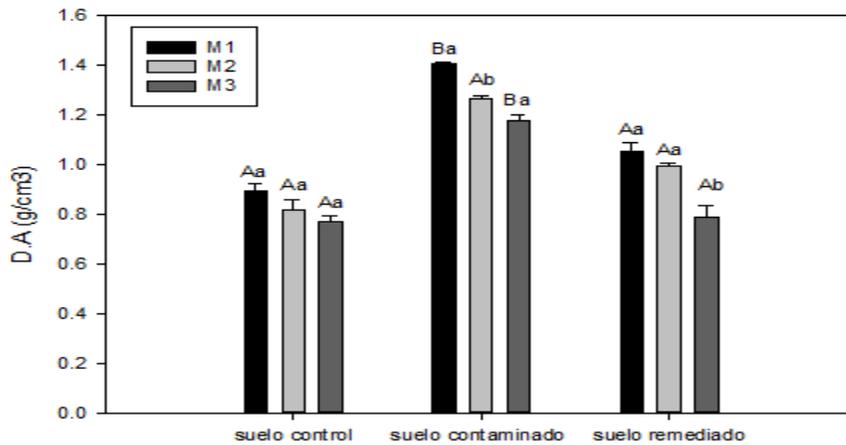
Inicialmente, el SG presentó los valores de humedad más altos, superando el 30% en los dos primeros muestreos (M1 y M2), posiblemente debido a la aplicación inicial del herbicida glifosato, que es un compuesto líquido y pudo haber aumentado la humedad (Hillel, 1998); sin embargo, esta humedad disminuyó drásticamente en el último muestreo (M3), alcanzando valores cercanos al 20%. Por otro lado, SR mostró un comportamiento intermedio, con una humedad alta en M1 (alrededor del 25%) que disminuyó gradualmente hasta alcanzar valores cercanos al 20% en M3. En contraste, el SC mantuvo una humedad relativamente alta y estable (alrededor del 25%) en los tres muestreos (M1, M2 y M3), ya que no se sometió a procesos que pudieran afectar drásticamente sus propiedades (Doran y Jones, 1996).

En cuanto a la comparación de datos con otros autores y la humedad de suelos Andisoles en el departamento de Nariño, Colombia, Ramos et al. (2011) reportaron que en suelos Andisoles bajo cultivo de papa en Nariño, la humedad gravimétrica osciló entre 25% y 35%, dependiendo de la profundidad y el manejo del suelo. Nuestros valores de humedad para el suelo control se encuentran dentro de este rango. Sin embargo, para los suelos contaminados y remediados, se observa una mayor variación, lo que sugiere que la aplicación de glifosato y el proceso de remediación influyeron en la dinámica de la humedad del suelo de manera más significativa en comparación con los suelos de cultivo de papa en la misma región.

Se destaca que aunque se observaron variaciones en la humedad del suelo entre los tratamientos y las muestras, la figura 5 no mostró diferencias estadísticamente significativas. Esto pudo deberse a la variabilidad inherente natural del suelo en una misma área de estudio, un rango de variación aceptable considerado normal para el tipo de suelo y las condiciones ambientales, como también el tamaño de muestra o la potencia estadística utilizada, considerando que se debería hacer más repeticiones en un tiempo más prologando.

Figura 6

Determinación de densidad aparente



Nota. Letras mayúsculas indican diferencias significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos, las letras minúsculas indican diferencias significativas ($p < 0.05$) entre muestreos dentro del mismo tratamiento.

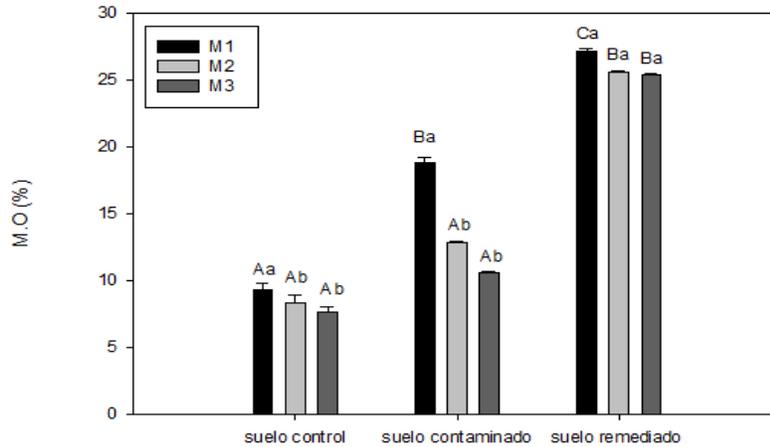
La densidad aparente es un parámetro importante en los suelos, especialmente en los Andisoles, ya que está relacionada con la compactación del suelo y afecta directamente propiedades como la porosidad, la capacidad de retención de agua y la resistencia a la penetración de las raíces (Nanzyo et al., 1993).

Como se observa en la figura 6, el SC mantiene valores constantes de DA alrededor de 0.8 g/m³. Esta estabilidad es esperada, ya que no se aplicó ningún contaminante o tratamiento que pudiera alterar significativamente la estructura del suelo Andisol.

Por otro lado, en el SG, se observa un incremento inicial en la DA, para el M1 alcanzando valores cercanos a 1.5 g/cm^3 y terminado en valores por debajo de 1.2 g/cm^3 para el M3. Este aumento inicial está relacionado con la descomposición de la materia orgánica y la reacción del herbicida glifosato sobre el suelo, en cuanto a la disminución progresiva se debe a la actividad microbiana presente en este tipo de suelos, la cual es capaz de degradar compuestos orgánicos como el glifosato (Sireesha et al., 2019). Los Andisoles son suelos con altos contenidos de materia orgánica y su mineralización puede causar cambios en la estructura del suelo (Dahlgren et al., 2022).

Finalmente se observa en el SR, una reducción significativa en la DA, alcanzando valores entre 1.0 g/cm^3 a 0.8 g/cm^3 . Esta disminución se atribuye a la aplicación del abono orgánico, el cual mejora la estructura del suelo y reduce la compactación (Maji et al., 2017). Los Andisoles son suelos que responden positivamente a la adición de enmiendas orgánicas, ya que estas ayudan a mantener su estructura estable y mejorar sus propiedades físicas (Nanzyo et al., 1993). Es importante destacar que los Andisoles presentan valores de DA relativamente bajos en comparación con otros tipos de suelos, debido a su alto contenido de materia orgánica y su estructura porosa (Nanzyo et al., 1993). Por lo tanto, los valores observados en la gráfica son consistentes con los rangos esperados para este tipo de suelo.

El hecho de que para el T3 exista una diferencia significativa en la densidad aparente entre la M3 comparándolo con los valores de M2 y M1, lleva a la conclusión que el proceso de remediación con abono orgánico logró mejorar y consigue un mejor efecto con el tiempo ayudando a recuperar la estructura del suelo y disminuir su compactación de manera efectiva, acercándolo a las condiciones físicas esperadas para un Andisol en buenas condiciones.

Figura 7*Determinación de materia orgánica*

Nota. Letras mayúsculas indican diferencias significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos, las letras minúsculas revelan diferencias significativas ($p < 0.05$) entre muestreos en el mismo tratamiento.

El contenido de materia orgánica (MO) en los suelos es un indicador clave de su calidad y fertilidad, ya que influye en las propiedades físicas, químicas y biológicas (Jaramillo, 2002). Por ello, se evaluó el efecto de tres tratamientos en el contenido de MO en un suelo a través del tiempo.

Tabla 5*Rango MO*

Bajo	<2%
Medio	2-4%
Alto	>4%

Fuente: Jaramillo (2002)

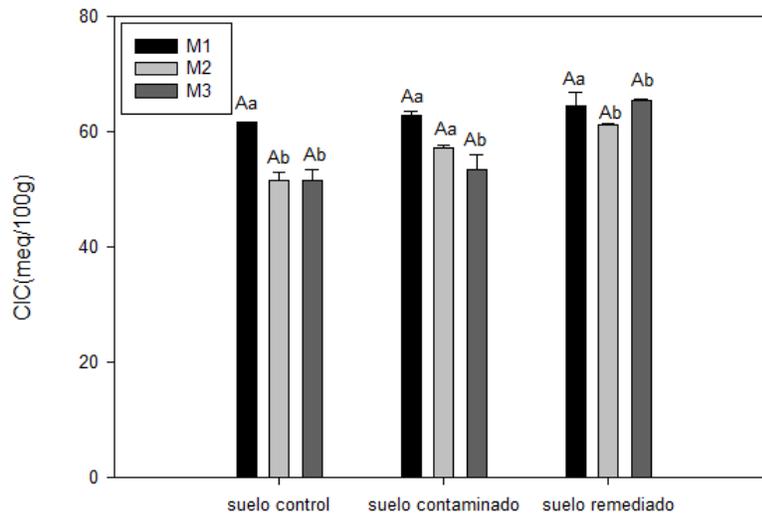
Los resultados obtenidos (Figura 7) muestran diferencias significativas en el contenido de MO entre los tratamientos evaluados. El SR con enmiendas orgánicas presentó los mayores niveles de MO en los tres muestreos realizados con un porcentaje mayor al 20% (M1, M2 y M3), lo que coincide con la investigación realizada por Salinas et al. (2001) en un estudio de suelos agrícolas

del Valle del Cauca, donde la aplicación de abonos orgánicos aumentó significativamente el contenido de MO. Esto se atribuye a que las enmiendas orgánicas aportan carbono y nutrientes, mejorando así las condiciones para el desarrollo de la actividad microbiana y la descomposición de la materia orgánica.

Por otro lado, el SG con glifosato mostró un comportamiento particular. En el muestreo M1 (7 días), el contenido de MO fue superior con un 18% aproximadamente al del suelo control, lo que se atribuye a una respuesta inicial de los microorganismos ante la presencia del herbicida, sin embargo, en los muestreos posteriores (M2 y M3), el contenido de MO disminuyó, hasta alcanzar un 10% de MO, debido a la degradación continua del glifosato y su efecto inhibitorio sobre la actividad microbiana. Finalmente, el SC presentó los menores niveles de MO en los tres muestreos, lo que era esperado al no recibir ningún aporte de enmiendas ni contaminación. No obstante, se observó un ligero aumento en el contenido de MO a través del tiempo, lo que podría atribuirse a la descomposición natural de la materia orgánica presente en el suelo (Jaramillo, 2002).

Figura 8

Determinación de capacidad de intercambio catiónico



Nota. Letras mayúsculas indican diferencias significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos, las letras minúsculas indican diferencias significativas ($p < 0.05$) entre muestreos dentro del mismo tratamiento.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es un parámetro fundamental en la evaluación de la fertilidad y calidad de los suelos. Representa la habilidad del suelo para retener y liberar cationes, los cuales son nutrientes esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas (Navarro y Navarro, 2013).

Tabla 6

Rangos CIC

Muy baja	<5meq/100g
Baja	5-15meq/100g
Media	15-25meq/100g
Alta	25-40meq/100g
Muy alta	>40meq/100g

Fuente: Navarro y Navarro (2013)

Se observa en la figura 8, que el SC presentó niveles muy altos de CIC que van desde 50 meq/100g hasta casi alcanzar los 60 meq/100g, estos valores se deben al tipo de suelo estudiado que es un andisol, los cuales se caracterizan por ser ricos en nutrientes y tener buena actividad microbiana, además de que este suelo no ha sido expuesto a sustancias químicas, lo cual concuerda con los hallazgos de Figueroa y Guzmán (2020), quienes encontraron que suelos sin disturbios antrópicos mantienen una CIC óptima para el intercambio de cationes.

Por otro lado, se observa que tanto el SC, SG y SR no tienen diferencias significativa entre tratamientos y tienen niveles altos de CIC en las tres muestras, esto se atribuye a que esta propiedad es intrínseca del suelo y no varía mucho en estudios a corto plazo.

Se destaca que, el SR mostró valores muy favorables de CIC con un rango entre 55 meq/100g y sobrepasando los 60 meq/100g, indicando que el tratamiento contribuyó un poco al aumento de la capacidad de intercambio catiónico en el suelo, concordando con los hallazgos de Rodríguez (2020) quienes reportaron un aumento significativo de la CIC en suelos degradados de Colombia después de la aplicación de enmiendas orgánicas.

2.3. Análisis y discusión del tercer objetivo

El glifosato es un herbicida no selectivo de amplio espectro, el principal producto de degradación de este agroquímico es el ácido aminometilfosfónico (AMPA), el cual también se comporta como herbicida y tiene gran capacidad de permanencia en el suelo durante largos periodos (Corrales et al., 2015).

La cromatografía líquida de alta resolución (HPCL) es una técnica analítica utilizada para determinar glifosato y AMPA en diversas matrices como suelo, agua y alimentos (Veiga et al., 2022). Esta metodología proporciona una separación eficaz de los analitos, además de tener una alta sensibilidad y selectividad al momento de realizar el procedimiento, convirtiéndose en una herramienta esencial para dichos análisis.

En la presente investigación, se utilizó la metodología de HPCL con una columna de fase reversa C18 y una fase móvil compuesta por agua y acetonitrilo. Esta combinación específica es efectiva en la separación y análisis de glifosato y su metabólico AMPA (ácido aminometilfosfónico). La columna y la fase móvil están seleccionadas para maximizar la resolución y la selectividad entre estos dos compuestos, lo que permite una separación eficiente y precisa (Botero et al., 2013; Veiga et al., 2022).

Tabla 7

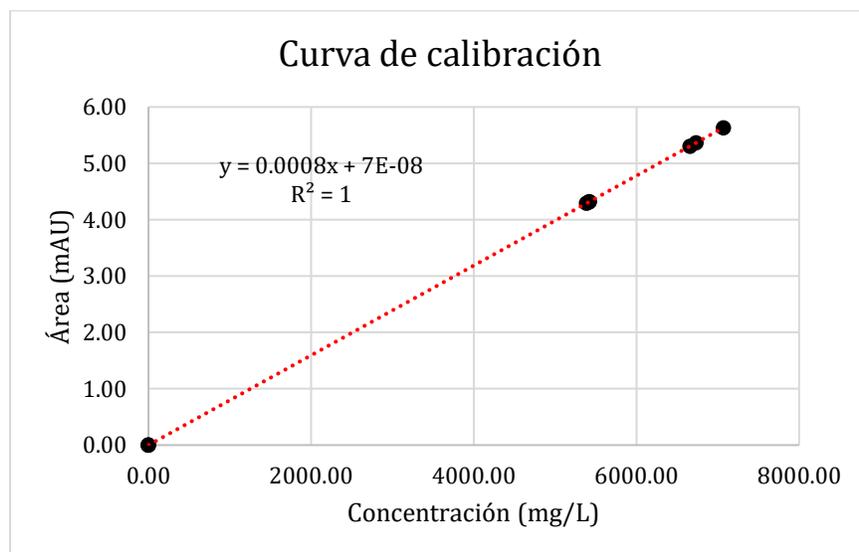
Condiciones cromatográficas

Equipo	HPLC Thermo Scientific Ultimate 3000 RS
Columna	Zorbax Eclipse Plus C18
Fase	Agua (20%) – Acetonitrilo (80%)
Flujo	1ml/min
Temperatura	55 °C
Volumen de inyección	10 µL
Detectores	UV-vis/RI (195nm)

Tabla 8*Tiempo muestreo*

Muestra	Tiempo
Suelo control (SC1)	7 DIAS
Suelo control (SC2)	15 DIAS
Suelo control (SC3)	30 DIAS
Suelo glifosato (SG1)	7 DIAS
Suelo glifosato (SG2)	15 DIAS
Suelo glifosato (SG3)	30 DIAS
Suelo remediado (SR1)	7 DIAS
Suelo remediado (SR2)	15 DIAS
Suelo remediado (SR3)	30 DIAS

Nota. Se incluyó un estándar de glifosato (Sigma Aldrich - Ref. 45521) y un estándar de AMPA.

Figura 9*Curva de calibración área/concentración*

Se construyó una curva de calibración figura 9, para relacionar el área bajo la curva obtenida en el cromatograma con la concentración de glifosato. Esta técnica es ampliamente utilizada en el

análisis de compuestos orgánicos por cromatografía líquida de alta resolución (HPLC), la curva de calibración muestra una excelente linealidad con un coeficiente de determinación (R^2) de 1, lo que indica una correlación perfecta entre el área y la concentración (Harris, 2007). Esto implica que el modelo de regresión lineal utilizado para construir la curva de calibración es adecuado y permite cuantificar con precisión las concentraciones de glifosato en las muestras analizadas (Miller y Miller, 2002).

En la tabla 9 se puede observar los resultados de la Cromatografía de alta eficiencia HPLC y su variación con respecto al tiempo, donde el tiempo de retención del glifosato fue aproximadamente 2,225 minutos para las muestras SG y 2,295 minutos para las muestras SR. Esta variación puede atribuir a diferencias en la composición de las muestras, además de otros compuestos que pueden interactuar con la fase estacionaria cromatográfica (Ibáñez et al., 2005). Cabe resaltar que los tiempos de retención obtenidos son coherentes con los resultados de otras investigaciones donde utilizaron columnas de fase reversa C18 para determinar el glifosato presente en muestra mediante la técnica de HPLC (Botero et al., 2013).

Tabla 9

Resultados obtenidos con la técnica de HPLC en los tres tratamientos

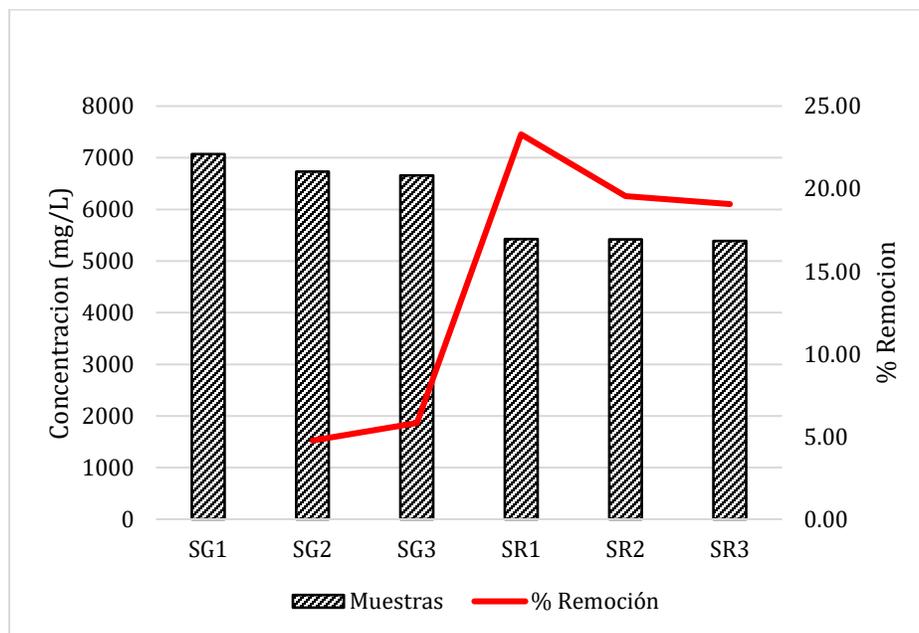
Tiempo (días)	Tratamientos		% Remoción
	Concentración (mg/L)		
7	SG1	SR1	23,29
	7070.24	5423.36	
15	SG2	SR2	19,56
	6733.61	5416.71	
30	SG3	SR3	19,08
	6658.17	5388.09	

Nota. Las muestras de suelo control (SC) no mostraron presencia de glifosato, debido a que a este no se le realizó ninguna intervención de contaminación ni remediación, con el fin de tener una muestra en blanco y poder compararlo con el resto de tratamientos.

Las concentraciones de glifosato en las muestras SG fueron alrededor de 7000 mg/L, mientras que en las muestras SR fueron aproximadamente 5400 mg/L, estas concentraciones son considerablemente altas comparadas con niveles típicos de concentración en suelos agrícolas, donde estos valores oscilan entre 0,1 y 10 mg/kg (Aparicio et al., 2013). Las elevadas concentraciones resultante de esta investigación se deben a que se realizó el estudio a escala laboratorio, donde se aplicó directamente el Herbicida al suelo, con el fin de analizar cual eficaz es la remediación por medio de estiércol mineralizado, de acuerdo al diseño de experimento planteado.

Figura 10

Grafica de relación entre concentración y remoción de glifosato



Nota. El gráfico muestra las concentraciones de glifosato antes y después del tratamiento, así como los porcentajes de remoción para cada muestra.

Los porcentajes de remoción de glifosato en las muestras SR1, SR2 y SR3 fueron 23.29%, 19.56% y 19.08%, respectivamente. En el diagrama de barras (figura 10) se puede observar la disminución en la concentración de glifosato en las muestras de SR (suelo remediado) en comparación con las muestras de SG (suelo glifosato), esta disminución en las concentraciones

podría deberse a un proceso de disolución. La disolución es un proceso físico en el que una sustancia (soluto) se dispersa de manera homogénea en otra sustancia (solvente), este proceso implica la separación de las partículas del soluto y su distribución uniforme en el solvente (Cuevas et al., 2012).

Esto indica que el tratamiento con estiércol de cabra fue efectivo para remover aproximadamente el 20% del glifosato presente en las muestras. Debido a que el estiércol mineralizado de cabra, contiene una amplia variedad de microorganismos, incluyendo bacterias y hongos, que contribuyen a la degradación del glifosato, estos microorganismos utilizan los principales componentes de este herbicida como fuentes de carbono y nitrógeno, promoviendo así su degradación (Álvarez et al., 2010).

Tabla 10

Resultados AMPA cromatografía por el método HPCL

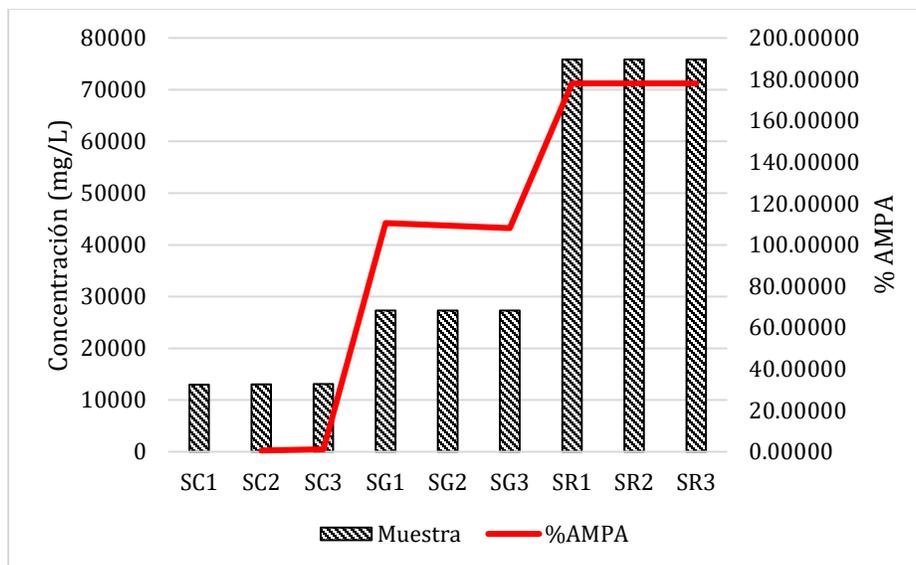
Muestra	Concentración (mg/L)	AMPA en muestra (%)
SG1	27277.22	110.47660
SG2	27277.22	109.26202
SG3	27277.22	108.06121
SR1	75844.26	178.04982
SR2	75844.26	178.04982
SR3	75844.26	178.04982

El tiempo de retención del AMPA fue aproximadamente 1,270 minutos para las muestras SG y 1,252 minutos para las muestras SR, en comparación con los resultados que se obtuvieron en el tiempo de retención para glifosato, se puede observar que la variación en tiempo es mínima lo que puede atribuirse a diferencias en la composición de la matriz en muestra o la presencia de otros compuestos que interactúan con la fase estacionario de la columna cromatográfica (Botero et al., 2013).

Se destaca que los tiempos de retención obtenidos para el AMPA son similares con los reportados en otros estudios (Aparicio et al., 2013), en su investigación evaluó el destino ambiental del glifosato y el AMPA en aguas superficiales y suelos de cuencas agrícolas de Argentina. Utilizando cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas en tándem (LC-MS/MS) con una columna de fase reversa C18 para determinar las concentraciones de estos compuestos, reportando un tiempo de retención de aproximadamente 1,3 minutos para el AMPA.

Figura 11

Concentración y porcentaje de AMPA (ácido aminometilfosfónico)



Las concentraciones de AMPA en las muestras SC fueron alrededor de 13000 mg/L, en las muestras SG fueron aproximadamente 27000 mg/L, y en las muestras SR fueron alrededor de 75000 mg/L. Estos niveles son altos y representan un alto riesgo para el medio ambiente y la salud humana según la bibliografía estudiada, pero se infiere que estos valores se deben a que el estudio de caso se realizó a escala laboratorio, siguiendo un diseño de experimental.

El análisis conjunto de las gráficas de conductividad eléctrica (CE) (Figura 4) y concentraciones de AMPA (ácido aminometilfosfónico) (Figura 11) reveló una clara correlación entre ambos parámetros. Las muestras de suelo remediado (SR) presentaron los valores más altos de CE.

Esta correlación se explica por la naturaleza iónica del AMPA, que contiene un grupo fosfónico ionizable, lo que le confiere la capacidad de conducir corriente eléctrica en solución. Por lo tanto, a mayor concentración de AMPA, mayor será la conductividad eléctrica registrada (Aparicio et al., 2013; Rampoldi et al., 2014).

Es importante tener en cuenta que las concentraciones más elevadas de AMPA se encontraron en las muestras SR, sugiriendo que el proceso de remediación tuvo un efecto positivo en cuanto a la degradación de glifosato a su principal metabolito, el AMPA (Rampoldi et al., 2014). Estos fenómenos son comunes en procesos de remediación de suelos contaminado por glifosato, ya que el AMPA es un producto intermedio en la ruta de degradación del herbicida.

El método de remediación empleado es eficaz para la recuperación y mejora de las propiedades físicas y químicas del suelo (Rampoldi et al., 2019).

3. Conclusiones

En conclusión, basándonos en nuestra hipótesis planteada, los resultados obtenidos en este estudio demuestran que la aplicación de abono orgánico mineralizado de estiércol de cabra tiene un efecto positivo en la restauración de las propiedades físicas y químicas del suelo contaminado por glifosato, el abono orgánico mineralizado contribuyó a la neutralización de la acidez del suelo, acercándolo a un pH más neutro. Esto es importante, ya que un pH adecuado favorece la disponibilidad de nutrientes para las plantas y promueve su crecimiento saludable, además, se observó una mejora en la capacidad de intercambio catiónico del suelo remediado, lo que indica una mayor capacidad para retener y suministrar nutrientes a las plantas.

Estos resultados sugieren que la aplicación de abono orgánico mineralizado de estiércol de cabra, aprovechando este desecho, puede ser una estrategia efectiva para la remediación de suelos contaminados por glifosato. Esta enmienda orgánica, que utiliza un residuo como el estiércol, mejora la calidad del suelo, creando condiciones favorables para el crecimiento de las plantas y promoviendo la recuperación del ecosistema afectado. El uso del estiércol, un desecho que de otro modo sería desperdiciado, representa un enfoque sostenible y respetuoso con el medio ambiente para la remediación del suelo. Sin embargo, es importante tener en cuenta que este estudio se realizó en condiciones controladas de laboratorio y se necesitan más investigaciones a campo para evaluar la efectividad de esta estrategia en situaciones reales. Además, es fundamental considerar otros factores como la persistencia del glifosato en el suelo a largo plazo y su potencial impacto en la salud humana y el medio ambiente.

4. Recomendaciones

Promover el uso de abono orgánico mineralizado de estiércol de cabra como una estrategia de remediación para suelos contaminados con glifosato, ya que este tipo de enmienda orgánica ha demostrado ser efectiva en la mejora de las propiedades físicas y químicas del suelo, creando condiciones favorables para el crecimiento de las plantas y la recuperación del ecosistema.

Realizar más investigaciones a campo para evaluar la efectividad de la aplicación de abono orgánico mineralizado en situaciones reales. Es importante considerar diferentes tipos de suelos, condiciones climáticas y niveles de contaminación para obtener resultados más representativos y aplicables y así mismo evaluar la persistencia del glifosato en el suelo a largo plazo, aunque se observó una mejora en las propiedades del suelo después de la aplicación del abono orgánico mineralizado, es necesario investigar si el glifosato se degrada por completo o si aún puede tener efectos negativos en el medio ambiente y la salud humana y así mismo considerar la implementación de prácticas agrícolas sostenibles que reduzcan la dependencia del glifosato y otros agroquímicos.

Es importante informar a los agricultores, consumidores y tomadores de decisiones sobre los riesgos asociados con el uso indiscriminado de este herbicida y promover prácticas agrícolas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente.

Se recomienda llevar a cabo estudios con un mayor número de días de muestreo y en áreas más extensas para comprender mejor el impacto del ácido aminometilfosfónico (AMPA), un producto derivado del glifosato, el cual al ser más persistente que el propio herbicida, puede permanecer en el suelo durante períodos prolongados, lo que resulta en daños continuos en la estructura y la actividad microbiana del suelo, estudios más avanzados permitirían una evaluación más exhaustiva de los efectos del AMPA en la diversidad y la función de la microbiota, ayudando a comprender mejor las implicaciones a largo plazo de la contaminación.

Referencias bibliográficas

- Abahonza, D., Benavides, O., Fajardo, C., y Huertas, J. (2022). Remediación de suelos degradados con glifosato a partir de enmiendas orgánicas a escala laboratorio. En J. Huertas, L. Torres, L. Lafaurie, y J. Insuasty, *Las ciencias ambientales y su avance sin fronteras durante la pandemia* (págs. 153-157). Corregimiento del río Bobo, en el departamento de Nariño: Editorial UNIMAR.
- Aguñaga, A., Medina, K., Garruña, R., Latournerie, L., y Ruíz, E. (2020). Efecto de abonos orgánicos sobre el rendimiento, valor nutritivo y capacidad antioxidante de tomate verde (*Physalis ixocarpa*). *Acta Universitaria*, 30, 1-14. <https://doi.org/10.15174/au.2020.2475>
- Alcaldía Municipal de Pasto. (2013). *Corregimiento de Catambuco*. <https://www.turismopasto.gov.co/corregimientos-n/catambuco/>
- Álvarez, D., Estrada, M., y Cock, J. (2010). *RASTA Rapid Soil and Terrain Assessment: Guía práctica para la caracterización del suelo y del terreno*. <https://cgspace.cgiar.org/items/ee7882aa-299f-491a-9d43-4e6a4c15899f>
- Aparicio, V., Degeronimo, E., Hernández, K., y Jesabel, D. (2015). *Los plaguicidas agregados al suelo y su destino en el ambiente*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Arreguin, F. (2015). Uso eficiente del agua. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 1, 9-22. <https://www.revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/657>
- Beldomenico, H. (2021). *Impacto de los plaguicidas en los alimentos, el ambiente y la salud en Argentina. Revisión bibliográfica y propuestas superadoras*. <https://n9.cl/be2ng>
- Bigham, J., y Ciolkosz, E. (1993). *Soil color*. Soil Sience Society of América.

- Borbor, M., Boyer, E., McDowell, W., y Hall, C. (2006). Nitrogen and phosphorus budgets for a tropical watershed impacted by agricultural land use: Guayas, Ecuador. *Biogeochemistry*, 79(1), 135-161. <https://doi.org/10.1007/s10533-006-9009-7>
- Botero, A., Ibáñez, M., Sancho, J., y Hernández, F. (2013). Direct liquid chromatography–tandem mass spectrometry determination of underivatized glyphosate in rice, maize and soybean. *Journal of Chromatography A*, 1313, 157-165. <https://repositori.uji.es/xmlui/handle/10234/92453>
- Brady, N., y Weil, R. (2008). Nitrogen and sulfur economy of soils. En N. Brady, y R. Weil, *The nature and properties of soil* (págs. 662-710). Prentice-Hall.
- Buol, S., Southard, R., Graham, R., y McDaniel, P. (2011). *Soil Genesis and Classification: Buol/Soil Genesis and Classification*. John Wiley y Sons, Inc.
- Burbano, H. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 33(2), 117 - 124. <https://doi.org/10.22267/rcia.163302.58>
- Cañero, A. (2013). *Uso de residuos de almazara como enmienda orgánica: efecto en el comportamiento de herbicidas, parámetros fisiológicos del cultivo y población microbiana del suelo*. [Tesis de pregrado, Universidad de Sevilla] Repositorio US: <https://idus.us.es/handle/11441/71109>
- Chasquero, J. (2022). *Utilización de glifosato y su efecto en las propiedades químicas en suelos cultivados de café (Coffea arabica), en distrito La Coipa, San Ignacio – Cajamarca 2022*. [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Amazónica] Repositorio UPA: <https://repositorio.upa.edu.pe/handle/20.500.12897/374>
- Coloma, P. (2011). *Los bienes jurídicos protegidos a través de los derechos de la naturaleza como evolución de aquellos protegidos por el derecho humano a vivir en un ambiente sano*. [Tesis de

pregrado, Pontificia Universidad Católica del Ecuador] Repositorio Interculturalidad:
<https://repositoriointerculturalidad.ec/xmlui/handle/123456789/3154?show=full>

Colombia Mapas. (2023). *Mapa de Catambuco*. <https://www.colombiaenmapas.gov.co/>

Corrales, L., Antolinez, D., Bohórquez, J., y Corredor, A. (2015). Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. *Nova*, 13(23), 55-81. <http://www.scielo.org.co/pdf/nova/v13n24/v13n24a06.pdf>

Cortés, S., y Moná, J. (2019). Revisión de los impactos ambientales y los efectos en la salud humana generados a partir del uso de glifosato en la erradicación de cultivos ilícitos en Colombia. *CES Salud Pública*, 9(2), 36-50. https://revistas.ces.edu.co/index.php/ces_salud_publica/article/view/5764

Cuevas, M., Solís, F., y Martínez, Á. (2012). Monitoreo de suelos contaminados mediante pruebas ecotoxicológicas. *Tlatemoani: revista académica de investigación*(11), 1-18. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7323794>

Dahlgren, R., Saigusa, M., y Ugolini, F. (2022). The Nature, Properties and Management of Volcanic Soils. *Advances in Agronomy*, 82, 113-182. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(03\)82003-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(03)82003-5)

Departamento de Agricultura de los Estados Unidos [USDA]. (2023). *Agencia federal USDA*. <https://www.usa.gov/es/agencias/departamento-de-agricultura>

Doran, J., y Jones, A. (1996). *Methods for Assessing Soil Quality*. SSSA Publication No. 49, . Soil Science Society of America.

Duarte, J. (2003). Ambientes de aprendizaje. Una aproximación conceptual. *Estudios pedagógicos (Valdivia)*(29), 97-113. <https://doi.org/10.4067/S0718-07052003000100007>

Escobar, M. (2022). *Evaluación de impacto de glifosato en propiedades físicas y químicas del suelo andisol mediante análisis cuantitativo*. [Tesis de especialización, Universidad Ecci] Repositorio ECCI: <https://repositorio.ecci.edu.co/handle/001/3070>

Farinango, J., y López, T. (2022). *Evaluación de una estrategia de biorremediación de suelos de páramo afectados por incendio mediante consorcios de microorganismos nativos del Parque Nacional Cayambe Coca*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte] Repositorio UTN: <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/13309>

Fernández, A. (2014). *Contaminación en suelos de la provincia de Buenos Aires con el herbicida organofosforado (glifosato) : impacto sobre la comunidad de hongos filamentosos*. [Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires] Biblioteca Digital UBA: https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/collection/tesis/document/tesis_n5443_FernandezDiParado

Figueroa, L., y Guzmán, D. (2020). Análisis de los efectos generados en el suelo a causa de la inadecuada disposición de envases de agroquímicos en la vereda Lavadero, Fómeque, Cundinamarca, Colombia. *Gestión y Ambiente*, 23(2), 250-272. <https://doi.org/10.15446/ga.v23n2.91063>

Gómez, A. (2022). *Alternativas de solución para la afectación ambiental por el uso del glifosato en Colombia*. [Tesis de pregrado, Universidad Antonio Nariño] Repositorio UAN: <https://repositorio.uan.edu.co/items/3fe62723-c563-4ddb-a3c4-61fa199bfecb>

Gómez, D., Cano, A., y Villar, D. (2021). Destino ambiental y efectos ecológicos de los tres herbicidas más utilizados en Colombia. *CES medicina veterinaria y zootecnia*, 16(2), 47-75. <https://doi.org/10.21615/cesmvz.6238>

Harris, D. (2007). *Análisis químico cuantitativo*. Editorial Reverté.

Havlin, J., Beaton, J., Tisdale, S., y Nelson, W. (2005). *Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management* (7a ed.). Pearson Educational.

Hillel, D. (1998). *Environmental Soil Physics: Fundamentals, Applications, and Environmental Considerations*. Academic Press.

Ibáñez, M., Pozo, O., Sancho, J., López, F., y Hernández, F. (2005). Residue determination of glyphosate, glufosinate and aminomethylphosphonic acid in water and soil samples by liquid chromatography coupled to electrospray tandem mass spectrometry. *Journal of Chromatography*, 1081(2), 145-155. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2005.05.041>

Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC]. (2023). *Determinación de Bases Intercambiables Método del Acetato de Amonio IN PH 7.0*. <https://antiguo.igac.gov.co/es/contenido/determinacion-de-bases-intercambiables-metodo-del-acetato-de-amonio-1n-ph-70>

Jaramillo, D. (2002). *Introducción a la ciencia del suelo*. Universidad Nacional de Colombia.

Liang, M., Seager, S., Parkinson, C., Lee, A., y Yung, Y. (2003). *On the Insignificance of Photochemical Hydrocarbon Aerosols in the Atmospheres of Close-in Extrasolar Giant Planets*. The American Astronomical Society.

Maji, K., Dikshit, A., y Chaudhary, R. (2017). Human Health Risk Assessment Due to Air Pollution in the Megacity Mumbai in India. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 11(2), 61-70. <https://doi.org/10.5572/ajae.2017.11.2.061>

Mendieta, J. (2020). Conflictos territoriales en la sustitución de cultivos ilícitos. *Estudios de paz y conflictos*, 3(5), 63–79. <https://www.estudiosdepazyconflictos.com/index.php/eirene/article/view/105>

- Miller, J., y Miller, J. (2002). *Estadística y quimiometría para química analítica*. Pearson Educación.
- Moscoso, L., Marcila, N., y Hernández, R. (2019). Cambios proyectados a 2040 en los ecosistemas de la jurisdicción de Corantioquia. *Biodiversidad en la práctica*, 4(1), 173-188. <http://repository.humboldt.org.co/bitstream/handle/20.500.11761/35336/BEP3010-final.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Muñoz, F. (2021). *El herbicida glifosato y sus alternativas. Serie de informes técnicos IRET, (44)*. Serie de informes técnicos IRET: https://ipen.org/sites/default/files/documents/serie_tecnica_44_glifosato_1_1.pdf
- Murillo, S., Mendoza, A., y Fadul, C. (2020). The importance of organic amendments in soil conservation and agricultural production. *Revista Colombiana De Investigaciones Agroindustriales*, 7(1), 58-68. <https://doi.org/10.23850/24220582.2503>
- Nanzyo, M., Dahlgren, R., y Shoji, S. (1993). Chemical characteristics of volcanic ash soils. En p. a. Volcanic ash soils: genesis, *Shoji, S; Nanzyo, M; Dahlgren, R* (págs. 145-18). Elsevier.
- Narváez, C., Rendón, A., Cárdenas, Y., y Guerrero, O. (2014). *Caracterización fisicoquímica de suelos Andisoles bajo diferentes sistemas de uso en el departamento de Nariño, Colombia*. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- Natural Resources Conservation Service. (1993). *Soil Survey Manual*. Washington, D.C: U.S Government Printing Office.
- Navarro, G., y Navarro, S. (2013). *Química agrícola: química del suelo y de los nutrientes esenciales para las plantas*. Mundiprensa.

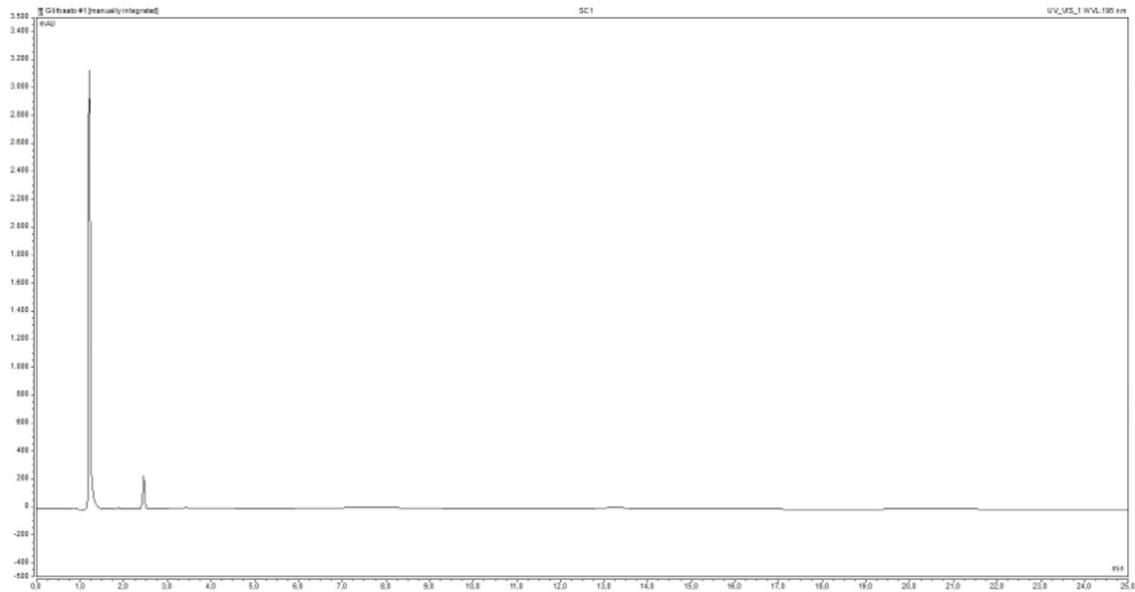
- Navarro, J., Aguilar, E., y López, J. (2007). Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. *Ecosistemas*, 16(2), 10-25. <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/125/122>
- Nivia, E. (2000). *Efectos sobre la salud y el ambiente de herbicidas que contienen glifosato*. http://www.mamacoca.org/docs_de_base/Fumigas/Nivia_Efectos_salud_ambiente_herbicidas_con_Glifosato.pdf
- Oficina de Naciones Unidas contra la Droga y el Delito [UNODC]. (2019). *Informe de Monitoreo de Territorios Afectados por Cultivos Ilícitos en Colombia (2019)*. <https://www.unodc.org/colombia/es/presentacion-informe-de-monitoreo-de-territorios-afectados-por-cultivos-ilicitos-en-colombia-2019.html>
- Pérez, G., Vela, N., Aatick, A., y Navarro, S. (2018). *Environmental Risk of Groundwater Pollution by Pesticide Leaching through the Soil Profile*. Intech Open.
- Pinedo, J., y Sandoval, J. (2020). *Revisión bibliográfica del uso de hongos en la biorremediación de suelos contaminados por agroquímicos*. [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo] Repositorio UCV: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/42053/browse?type=authorityvalue=Sandoval+Garc%C3%ADa%2C+Jason+Frank>
- Porta, J., López, R., y Roquero, C. (2003). *Edafología: para la agricultura y el medio ambiente*. Mundi-Prensa.
- Quintero, J. (2020). Usos y efectos del glifosato en Colombia. *Boletín Informativo CEI*, 7(1), 145-146. <https://revistas.umariana.edu.co/index.php/BoletinInformativoCEI/article/view/2223>
- Ramírez, R., Leiva, E., y Restrepo, R. (2022). Materia orgánica particulada y mineralogía de un Andisol bajo labranza y barbecho. *Acta Agronómica*, 70(4), 329–337. <https://doi.org/10.15446/acag.v70n4.80861>

- Ramón, J., Alba, J., y Vidorreta, J. (2010). *El vehículo eléctrico en España*. Pearson.
- Ramos, J., Benavides, D., y Castillo, J. (2011). *Evaluación de la estabilidad estructural de un suelo andisol (vitric haplustand) bajo diferentes usos en el altiplano de Pasto*. Universidad de Nariño : <https://sired.udenar.edu.co/5135/>
- Rampoldi, A., Singh, M., Wu, Q., Duan, M., Jha, R., Maxwell, J., . . . Xu, C. (2019). Cardiac Toxicity From Ethanol Exposure in Human-Induced Pluripotent Stem Cell-Derived Cardiomyocytes. *Toxicol Sci*, 169(1), 280-292. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfz038>
- Regñicoli, J. (2017). *Determinacion de la tolerancia y degradacion del herbicida glifosato por cepas de Aspergillus seccion Flavi no toxicogenicas nativas de suelos agricolas*. [Tesis de pregrado, Univrsidad Nacional de Río Cuarto] Repodigital UNRC: <https://repodigital.unrc.edu.ar/xmlui/handle/123456789/76962>
- Rengasamy, P. (2006). World Salinization with Emphasis on Australia. *Journal of Experimental Botany*, 57, 1017-1023. <https://doi.org/10.1093/jxb/erj108>
- Revista Semana. (2021). *Viaje a las entrañas de los cultivos de coca*. <https://www.semana.com/nacion/articulo/reportaje-viaje-a-las-entranas-de-los-cultivos-de-coca/202125/>
- Rodríguez, C. (2020). *Uso del glifosato en cultivos agrícolas e ilícitos: impacto en la microbiota del suelo a medida que aumenta la tasa de aplicación*. [Tesis de pregrado, Universidad de los Andes] Repositorio Uniandes: <https://repositorio.uniandes.edu.co/entities/publication/e6eb9735-9579-4d46-9372-77ecbea9ef43>
- Rucks, L., Kaplán, A., Ponce de León, J., y Hill, M. (2004). *Propiedades Físicas del Suelo*. College Park: Universidad de La República.

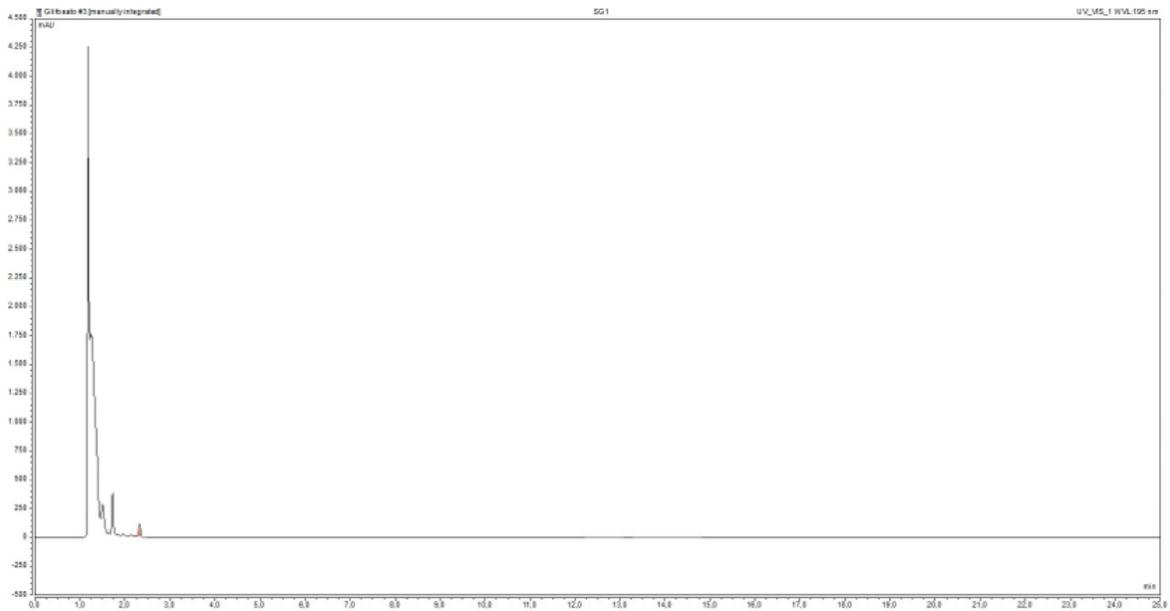
- Salinas, J., Báez, A., Tiscareño, M., y Rosales, E. (2001). Residue removal and tillage interaction effects on soil properties under rain-fed corn production in Central Mexico. *Soil and Tillage Research*, 59(1), 67-79. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(00\)00187-2](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(00)00187-2)
- Schulze, D., Nagal, L., Van Scoyoc, G., Henderson, T., y Baumgardner, M. S. (1993). Significance of organic matter in determining soil colors. En J. Bigham, y E. Ciolkosz, *Soil Color* (págs. 71–90.). Spec. Publ.
- Sepúl, T., y Velasco, J. (2002). *Tecnologías de remediación para suelos contaminados*. México: Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT).
- Sireesha, G., Padmaja, G., Sreenivas, C., y Rao, P. (2019). Fertilization regulates soil enzymatic activity under long term experiments of rice-rice cropping system. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 8(4), 2073-2076. <https://n9.cl/3k75j>
- Tripathi, A., Martínez, E., Obaidullah, A., Lete, M., Khan, D., y Bankaitis, V. (2019). Functional diversification of the chemical landscapes of yeast Sec14-like phosphatidylinositol transfer protein lipid-binding cavities. *J Biol Chem*, 294(50), 19081-19098. <https://doi.org/10.1074/jbc.RA119.011153>
- Veiga, O., Valcarce, M., y Romero, A. (2022). National Survey of Fitness Trends in Spain for 2022. *Retos*, 44, 625–635. <https://doi.org/10.47197/retos.v44i0.91036>
- Weil, R., y Brady, N. (2017). *The Nature and Properties of Soils* (15a ed.). Pearson.
- Zambrano, G. (2013). *Evaluación de la relación suelo-planta-animal a través de la producción y calidad composicional de la leche en Catambuco, Nariño*. [Tesis de maestría, Universidad de Nariño] Sired Udenar: <https://sired.udenar.edu.co/2570/>

Anexos

Anexo A. Cromatograma suelo control



Anexo B. Cromatograma suelo contaminado



Anexo C. Cromatograma suelo remediado

