



*Efecto del bio carbono en la bio remediación de suelos agrícolas contaminados por agrotóxicos*

*Effect of bio carbon on the bio remediation of agricultural soils contaminated by agrottoxins*

*Efeito do biocarbono na biorremediação de solos agrícolas contaminados por pesticidas*

Santiago Alberto Mayorga-Romero <sup>I</sup>  
[artedemayorga@gmail.com](mailto:artedemayorga@gmail.com)  
<https://orcid.org/0009-0004-8789-1535>

Oscar Gabriel Toapanta Cunalata <sup>II</sup>  
[oscartoapantaambjlm@gmail.com](mailto:oscartoapantaambjlm@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-5816-1785>

Yola Elizabeth Haro-Flores <sup>III</sup>  
[yharoregion3@gmail.com](mailto:yharoregion3@gmail.com)  
<https://orcid.org/0009-0005-4165-2392>

**Correspondencia:** [artedemayorga@gmail.com](mailto:artedemayorga@gmail.com)

Ciencias Técnicas y Aplicadas  
Artículo de Investigación

\* **Recibido:** 27 de mayo de 2024 \* **Aceptado:** 21 de junio de 2024 \* **Publicado:** 04 de julio de 2024

- I. Magíster en Agronomía, Mención Nutrición Vegetal e Ingeniero Agrónomo por la Universidad Técnica de Ambato, Profesor Investigador del Instituto Superior Tecnológico Pelileo, Coordinador Carrera de Flori-Fruticultura, Campus Benjamín Araujo, Tungurahua, Ecuador.
- II. Máster en Diseño Mecánico por la Universidad Técnica de Ambato, Ingeniero Mecánico por la Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, Maestrante en Matemática Aplicada y Doctorando en Ciencia e Ingeniería Estadística, Profesor Investigador del Instituto Superior Tecnológico Pelileo, Coordinador Campus Benjamín Araujo, Tungurahua, Ecuador.
- III. Ingeniera Zootecnista por la Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, Maestrante de Reproducción Animal en la ESPOCH, Profesora Investigadora del Instituto Tecnológico Pelileo, Coordinadora Carrera de Producción Animal, Campus Benjamín Araujo, Tungurahua, Ecuador.

## Resumen

El uso masivo de productos fitosanitarios en la agricultura, ha conducido a la contaminación de los suelos agrícolas, entre otros recursos relacionados con esta actividad, ocasionando una grave amenaza para la salud humana y el medio ambiente. En respuesta, el bio carbono, ha emergido como una prometedora herramienta para la bio remediación de suelos afectados por estos insumos. Esta revisión, examina la literatura científica sobre el efecto del bio carbono en la bio remediación de suelos contaminados. Además; se analizaron los mecanismos que influyen en la degradación y mitigación de insumos agrícolas, así como; sus efectos en la actividad microbiana y la calidad del suelo. Los hallazgos destacan la eficacia del bio carbono en reducir la contaminación y mejorar la salud del suelo, promoviendo la sostenibilidad agrícola. También; se identifican lagunas en el conocimiento y se proponen recomendaciones para investigaciones futuras, buscando mejorar las prácticas de bio remediación con el fin de reducir los impactos negativos de la contaminación. Por tanto, este estudio resalta el potencial del bio carbono y subraya la importancia de continuar investigando alternativas que garanticen el bienestar del recurso para garantizar la salud del suelo y del medio ambiente para las futuras generaciones.

**Palabras clave:** Insumos agrícolas; Bio carbono; Bio Remediación; Suelos agrícolas; Contaminación.

## Abstract

The massive use of phytosanitary products in agriculture has led to the contamination of agricultural soils, among other resources related to this activity, causing a serious threat to human health and the environment. In response, biocarbon has emerged as a promising tool for bioremediation of soils affected by these inputs. This review examines the scientific literature on the effect of biocarbon in the bioremediation of contaminated soils. Besides; The mechanisms that influence the degradation and mitigation of agricultural inputs were analyzed, as well as; its effects on microbial activity and soil quality. The findings highlight the effectiveness of bio carbon in reducing pollution and improving soil health, promoting agricultural sustainability. Also; Gaps in knowledge are identified and recommendations for future research are proposed, seeking to improve bioremediation practices in order to reduce the negative impacts of contamination. Therefore, this study highlights the potential of bio carbon and underlines the importance of

continuing to investigate alternatives that guarantee the well-being of the resource to guarantee the health of the soil and the environment for future generations.

**Keywords:** Agricultural inputs; Bio carbon; Bio Remediation; agricultural soils; Pollution.

## Resumo

A utilização massiva de produtos fitossanitários na agricultura tem levado à contaminação dos solos agrícolas, entre outros recursos relacionados com esta actividade, causando uma grave ameaça à saúde humana e ao ambiente. Em resposta, o biocarbono emergiu como uma ferramenta promissora para a biorremediação dos solos afetados por estes inputs. Esta revisão examina a literatura científica sobre o efeito do biocarbono na biorremediação de solos contaminados. Além do mais; Foram analisados os mecanismos que influenciam a degradação e mitigação dos inputs agrícolas, bem como; os seus efeitos na atividade microbiana e na qualidade do solo. As conclusões destacam a eficácia do biocarbono na redução da poluição e na melhoria da saúde do solo, promovendo a sustentabilidade agrícola. Também; São identificadas lacunas no conhecimento e propostas recomendações para investigação futura, procurando melhorar as práticas de biorremediação, de forma a reduzir os impactos negativos da contaminação. Assim sendo, este estudo destaca o potencial do biocarbono e sublinha a importância de continuar a investigar alternativas que garantam o bem-estar do recurso para garantir a saúde do solo e do ambiente para as gerações futuras.

**Palavras-chave:** Insumos agrícolas; Biocarbono; Biorremediação; solos agrícolas; Poluição.

## Introducción

En las últimas décadas, la contaminación del suelo por insumos agrícolas, ha emergido como un problema ambiental significativo en todo el mundo. La aplicación extensiva de insumos agrícolas para controlar plagas y enfermedades en los cultivos, ha dejado una huella ambiental duradera, afectando la calidad del suelo y comprometiendo la salud humana; así como, la biodiversidad. En respuesta a este desafío ambiental, la bio remediación, se ha posicionado como una estrategia prometedora para restaurar la salud y la funcionalidad de los suelos agrícolas contaminados. Tal estrategia, implica el uso de organismos vivos o sus componentes para degradar, transformar o

inmovilizar contaminantes en el suelo, ofrece una alternativa sostenible y respetuosa con el medio ambiente para remediar suelos contaminados. (Vélez et al., 2022).

En este contexto, el bio carbono ha surgido como un enfoque innovador en la bio remediación de suelos contaminados. Consiste en el uso de materia orgánica carbonosa de origen biológico, como compost, bio carbono y residuos agrícolas, presenta propiedades únicas que pueden mejorar la eficacia de la bio remediación al promover la actividad microbiana, adsorber contaminantes y mejorar la estructura del suelo, entre otros. (Álvarez Vargas, 2021).

El objetivo de este artículo de revisión es analizar y sintetizar la literatura científica relevante sobre el efecto del bio carbono en la bio remediación del recurso suelo. Se examinarán los mecanismos subyacentes y, las implicaciones prácticas de la aplicación de bio carbono en la restauración de la calidad del suelo; también, la mitigación de los impactos negativos derivados del uso persistente de fitofármacos. (Velez Azañero y Verona Falla, 2018).

Al abordar esta cuestión crítica, se espera que, este artículo proporcione una visión integral de los avances recientes en el campo y, sirva como guía para futuras investigaciones y prácticas de gestión ambiental orientadas hacia la sostenibilidad y la conservación de los recursos naturales, especialmente del suelo destinado a los cultivos de interés comercial. (Aquiye Ramos, 2019).

## **Metodología**

Para llevar a cabo esta revisión de literatura sobre el tema propuesto, efecto del bio carbono en la bio remediación de suelos agrícolas contaminados por insumos agrícolas, se implementó una metodología rigurosa que garantizara la exhaustividad y la calidad de la recopilación de información. Examinando la literatura científica relevante sobre el uso de bio carbono en la bio remediación de suelos agrícolas contaminados por insumos agrícolas, analizando los mecanismos subyacentes mediante los cuales el bio carbono puede influir en la degradación y mitigación de los insumos agrícolas en el suelo, evaluando los efectos del bio carbono en la actividad microbiana, la adsorción de contaminantes y la calidad del suelo en sistemas agrícolas contaminados, sintetizando los hallazgos clave y las tendencias emergentes en la investigación relacionada con el tema, identificando lagunas en el conocimiento y proporcionando recomendaciones para futuras investigaciones en el campo de la bio remediación de suelos agrícolas contaminados por insumos agrícolas con el uso de bio carbono. De este modo, detallamos seguidamente los pasos clave seguidos en este proceso.

El procedimiento empleado para la revisión bibliográfica del tema propuesto, fueron organizados sistemáticamente con el fin de planificar, desarrollar y analizar nuestra investigación, con el propósito de originar saberes acertados y confiables. Aplicando una metodología con base en principios lógicos fundamentados en la consideración de la evidencia empírica hasta llegar a conclusiones respaldadas por el rigor científico, partiendo de la consideración del problema evidente que, nos ha llevado a tratar esta revisión. El problema que abordamos, se centra en la pérdida de respuesta del suelo agrícola que, depende -en algunos casos- del uso de productos de síntesis para lograr producciones exigentes de los cultivos de interés comercial, desgraciadamente en detrimento de la actividad microbiológica del suelo que, en este caso está dejando de ser el aliado de la transformación de minerales por el uso de los insumos mencionados. De esta manera, los estudios a los que recurrimos, están enfocados en la obtención del bio carbono, el potencial de este recurso en las acciones bio remediadoras y, a la biorremediación como tal, observando el papel de este recurso en la agricultura, analizando en que consiste el fenómeno de la adsorción de fitofármacos y cómo se relaciona este efecto con la fertilidad; en este sentido, determinamos el papel del tamizado molecular para el mejoramiento de la calidad del suelo al optimizar la retención del agua y biocarbono promoviendo la estabilización de materia orgánica, en consecuencia; la actividad microbiana se beneficiaría por encontrarse, el suelo, en condiciones más adecuadas para propagarse, acción que, además; regularía o equilibraría el pH del suelo, promoviendo interacciones bioquímicas. Todas estas acciones, devolverían al suelo su plasticidad, permitiendo la reducción de la lixiviación y la escorrentía. Beneficio que se verificaría especialmente en el mediano y largo plazo.

## **Resultados**

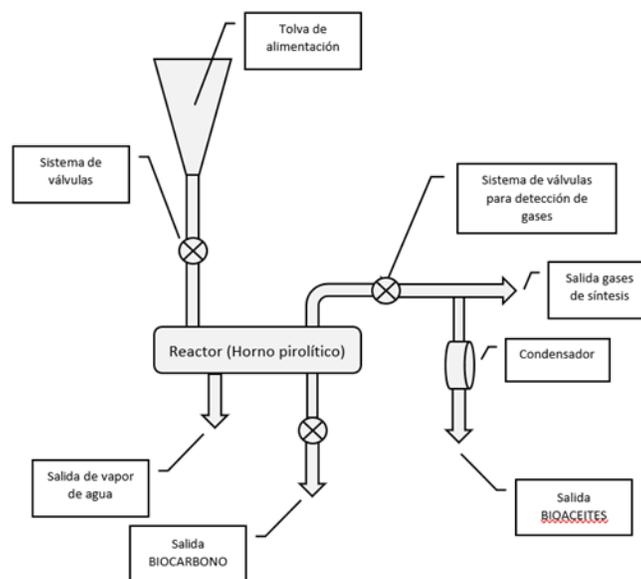
### **Obtención de bio carbono mediante pirólisis**

La pirólisis, es un proceso térmico que implica la descomposición de materiales orgánicos en ausencia de oxígeno, lo que resulta en la formación de productos carbonáceos, gases y líquidos. Figura 1. Se lleva a cabo en un reactor, donde se calienta la biomasa generalmente a 300°C y 700°C. Durante la pirólisis, la materia orgánica se descompone en C, H, O y otros. (Stadler-Kaulich y Hernando Perteguer, 2018).

El bio carbono resultante tiene una estructura porosa y una alta área superficial, lo que le confiere una serie de propiedades beneficiosas para el suelo, el medio ambiente y la agricultura. (Armijos et al., 2018).

El bio carbono posee alta porosidad y área superficial ideal para la retención de agua, nutrientes y contaminantes del suelo. Además, puede ayudar a mitigar el cambio climático al secuestrar carbono atmosférico y almacenarlo en el suelo durante períodos prolongados, reduciendo así las emisiones de gases de efecto invernadero. (Soto Espinosa et al., 2023).

**Figura 1:** Obtención de biocarbono mediante horno pirolítico



*Autor: Santiago Mayorga*

El bio carbono, en la agricultura, se puede utilizar como enmienda del suelo para mejorar la estructura y la fertilidad, para promover la descomposición de materia orgánica y la actividad microbiana beneficiosa. El bio carbono puede utilizarse en aplicaciones ambientales, como la remediación de suelos contaminados, la purificación de aguas residuales y la captura de contaminantes atmosféricos. (Baltazar y Castro, 2020).

El primer paso en la producción de bio carbono es la selección de la biomasa. Puede incluir residuos agrícolas, forestales, cáscaras de nueces, estiércol, entre otros. Es importante elegir una biomasa que sea abundante, económica y sostenible. (Segura-Chavarría, 2018).

El bio carbono puede someterse a un proceso adicional de activación, que implica el tratamiento con vapor de agua o agentes químicos para abrir aún más los poros y aumentar su capacidad de adsorción. Este paso puede mejorar las propiedades del bio carbono para remediación ambiental o la purificación de agua. (Salomón Barrezueta-Unda et al., 2022).

Tiene una serie de aplicaciones y beneficios que lo hacen invaluable en la búsqueda de soluciones sostenibles para los desafíos ambientales y agrícolas. Entre sus beneficios clave se incluyen la mejora de la calidad del suelo, la mitigación del cambio climático, la reducción de la contaminación del agua y del suelo, y la promoción de sistemas agrícolas más sostenibles y resilientes. (Santamaría y Rossignoli, 2021).

A medida que la investigación y el desarrollo continúan avanzando, se espera que la pirólisis juegue un papel cada vez más importante en la transición hacia una economía más sostenible y circular. (Salomón Barrezueta-Unda et al., 2022).

## **Biorremediación**

### **Papel del biocarbono en la agricultura**

La agricultura es una piedra angular de la civilización humana, pero su práctica ha dejado una marca considerable en el medio ambiente. La búsqueda de prácticas agrícolas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente ha llevado al desarrollo de nuevas tecnologías y enfoques. Uno de estos avances notables es el uso del bio carbono. (SALAS POZO, 2023).

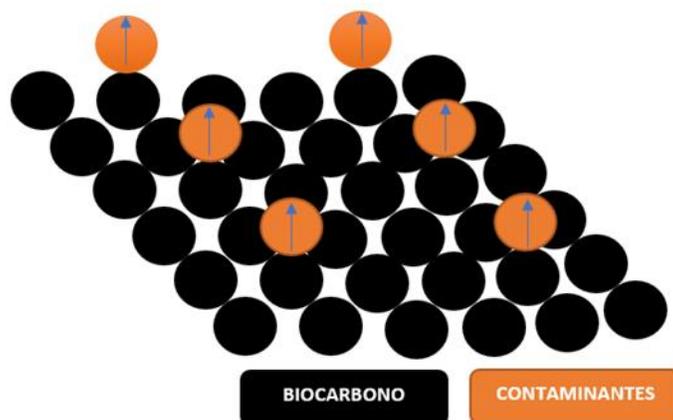
Su alta capacidad de adsorción lo convierte en una herramienta eficaz para mejorar la calidad del suelo al retener nutrientes y contaminantes, reduciendo así la lixiviación y la escorrentía. El bio carbono puede mejorar la estructura del suelo y promover la actividad microbiana beneficiosa, lo que resulta en suelos más fértiles. (CABRERA, 2021).

Al utilizar como enmienda del suelo, incluidos cultivos anuales, perennes, horticultura y producción de biomasa, restaura los suelos degradados, mitigando la contaminación. También se ha demostrado que el bio carbono al mejorar la eficiencia del uso del agua y nutrientes, lo hace especialmente relevante en regiones afectadas por sequías. (Salami et al., 2023).

### **Adsorción de insumos agrícolas**

El bio carbono, posee una alta capacidad de adsorción (Figura 2), debido a su área y estructura porosa. Cuando se aplica al suelo contaminado, el bio carbono puede adsorber ingredientes activos, evitando su lixiviación hacia las aguas subterráneas y reduciendo su disponibilidad para las plantas y los organismos del suelo. (Carrión Sánchez y Huaman Olmos, 2021).

*Figura 2: Superficie de biocarbono adsorbiendo contaminantes*



*Autor: Santiago Mayorga*

Esta adsorción de ingredientes activos, implica procesos físicos y químicos en la interfaz, entre biocarbono, agua y suelo. La adsorción es un fenómeno físico-químico en el que moléculas de un gas, líquido o soluto se adhieren a la superficie de un sólido o, en menor medida, a un líquido. Este proceso es fundamental en la catálisis y la remediación ambiental. (Reyes-Moreno et al., 2020).

El proceso de adsorción parte desde el adsorbente, en este caso, el biocarbono, es el material sólido que proporciona la superficie sobre la cual las moléculas se adhieren. Ejemplos comunes incluyen carbón activado, sílice gel y zeolitas, la eficacia del adsorbente depende de su área superficial, porosidad y propiedades químicas de la superficie. (Chanalata et al., 2022).

La adsorción ocurre por fuerzas intermoleculares como las de Van der Waals, enlaces de hidrógeno y, en algunos casos, interacciones electrostáticas, estas, causan que las moléculas del adsorbato (la sustancia que se adhiere, en nuestro caso los ingredientes activos) se mantengan en la superficie del adsorbente. (Pérez-Cabrera et al., 2021).

Posteriormente, se produce la difusión, cuando las moléculas del adsorbato (ingredientes activos agrícolas) se difunden desde la fase fluida (gas o líquido) hacia la superficie del adsorbente

(biocarbono) para continuar con la adhesión debido a las fuerzas de atracción mencionadas. (Chanalata et al., 2022).

El equilibrio, se alcanza cuando la tasa de adsorción es igual a la tasa de desorción (la liberación de las moléculas del adsorbato de la superficie del adsorbente) una vez que se producido la adsorción física (Fisorción) que implica las fuerzas de Van der Waals y es generalmente reversible. La energía involucrada es relativamente baja, por lo que puede ocurrir a temperaturas bajas y, finalmente la adsorción química (Quimisorción) que, involucra enlaces químicos más fuertes, como enlaces covalentes, y es generalmente irreversible (lo que nos interesa en el caso de la biorremediación). (Moreno-Riascos y Ghneim-Herrera, 2020).

Existen factores que afectan la adsorción, como la temperatura, cuando disminuye con el aumento de la temperatura, mientras que en la quimisorción aumenta hasta cierto punto con la temperatura. Debemos tomar en cuenta la presión, pues, existen insumos que tienden a la volatilización. En el caso de soluciones concentradas (varios fitofármacos), el adsorbato puede aumentar la adsorción hasta la saturación cuando el área del adsorbente tiene mayor capacidad de adsorción. (Chávez-García, 2022).

El bio carbono, con su estructura y superficie rica en microporos, proporciona sitios de adsorción para los insumos agrícolas que, pueden adherirse físicamente mediante fuerzas de atracción, e interacciones hidrofóbicas, sin formar enlaces químicos, reduciendo la movilidad de contaminantes, evitando la contaminación de aguas subterráneas. Esto reduce el riesgo de contaminación ambiental, protege la calidad del agua y estimula la actividad microbiana. (Mondragón-Sánchez et al., 2021).

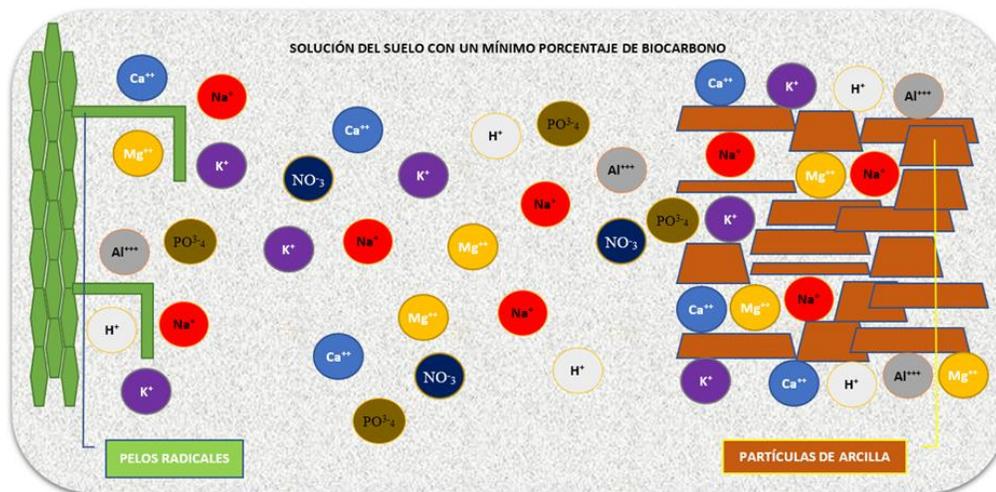
En contraste con la adsorción física, la química implica la formación de enlaces químicos entre los insumos agrícolas y los grupos funcionales presentes en la superficie del bio carbono, como los grupos hidroxilo (-OH) y carboxilo (-COOH). Los insumos agrícolas pueden formar complejos químicos con estos grupos funcionales, lo que aumenta su retención en el bio carbono. (De La Cruz, 2022).

### **Influencia del Bio Carbono en el intercambio iónico**

El intercambio iónico es un proceso que regula la disponibilidad de nutrientes para las plantas mediante la absorción y liberación de iones, como cationes (positivos) y aniones (negativos), por las partículas del suelo, coloides y materia orgánica. Los cationes para las plantas incluyen el

( $\text{Ca}^{2+}$ ), ( $\text{Mg}^{2+}$ ), ( $\text{K}^+$ ), y los aniones incluyen el nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) y el fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ). El intercambio iónico influye en la disponibilidad de estos nutrientes para las plantas, así como la capacidad de retención de agua y estructura del suelo. Figura 3. (Middelanis, 2019).

**Figura 3:** Desorción del biocarbono, liberando los nutrientes adsorbidos en las arcillas



*Autor:* Santiago Mayorga

El bio carbono puede adsorber cationes y aniones en su superficie y retenerlos en el suelo, haciendo que estén disponibles para las plantas. Puede desorber nutrientes cuando las condiciones del suelo cambian, liberándolos posteriormente; mediante un compuesto liberado de una superficie sólida o previamente adsorbida, la desorción ocurre cuando un compuesto es retenido en la superficie de otro material. (Delgado et al., 2019).

La desorción es la liberación de nutrientes previamente retenidos en el bio carbono o en las partículas del suelo. Por ejemplo, cuando un nutriente como el calcio es adsorbido por el bio carbono o las arcillas del suelo, puede ser desorbido bajo condiciones, como cambios en el pH del suelo o la introducción de otros iones competidores. (Medina Orozco y Medina Orozco, 2018).

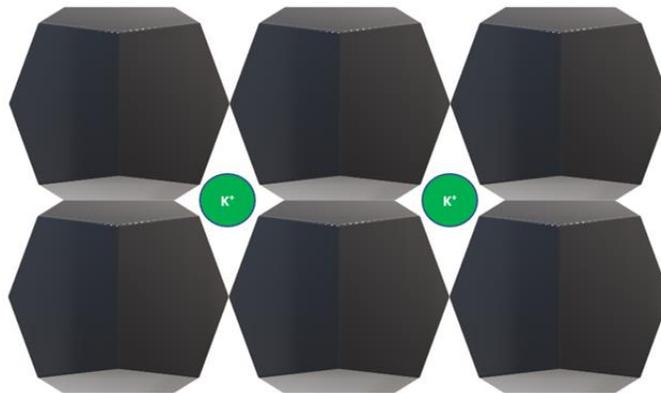
El bio carbono puede influir en el pH del suelo debido a sus propiedades alcalinas. Un aumento en el pH del suelo puede favorecer la desorción de cationes, como el Ca y el Mg, haciéndolos más disponibles. También puede aumentar la adsorción de aniones, como el fosfato que, puede reducir su disponibilidad en suelos alcalinos. (Escobar y Carlosama, 2021).

El bio carbono estabiliza nutrientes al formar complejos orgánico-minerales, esto ayuda a mantener una reserva de nutrientes disponibles para las plantas, mejorando la fertilidad del suelo, promoviendo mayor retención de agua. Al reducir la lixiviación de nutrientes y contaminantes, el bio carbono ayuda a proteger el agua previniendo la contaminación ambiental. (García et al., 2023). El bio carbono retiene nutrientes e iones en el suelo debido a su alta superficie específica y carga superficial negativa. Aumenta la capacidad de retener nutrientes como el nitrógeno, el fósforo y el potasio, reduciendo así la necesidad de fertilizantes sintéticos. (Lozano Reategui, 2023). Desempeña un papel crucial en el aumento de la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC). Cuando se incorpora al suelo contaminado, actúa como un reservorio de nutrientes como Ca, Mg, K y otros. (Hernández et al., 2024). También promueve la actividad microbiana, contribuyendo a la liberación gradual de nutrientes. Los microorganismos interactúan con el bio carbono, descomponiéndolo y liberando nutrientes adsorbidos en su estructura. (López et al., 2020).

### **Tamizado molecular con bio carbono**

El bio carbono, con su estructura porosa y alta área superficial, es un candidato ideal para el tamizado molecular en suelos agrícolas contaminados por insumos agrícolas. Esta capacidad de tamizado molecular permite que el bio carbono adsorba selectivamente los insumos agrícolas presentes en el suelo (Figura 4), atrapándolos en sus poros y cavidades y previniendo su lixiviación y dispersión en el medio ambiente. (Álvarez Vargas, 2021).

*Figura 4: Biocarbono tamizando partículas de potasio*



*Autor: Santiago Mayorga*

El tamaño molecular de los insumos agrícolas puede ser un factor determinante en su adsorción por el bio carbono. Las moléculas más grandes pueden ser excluidas físicamente de los poros más pequeños del bio carbono, lo que limita su capacidad de adsorción. El tamaño y la forma de los poros del bio carbono pueden influir en la adsorción. (Huerta De La Cruz, 2020).

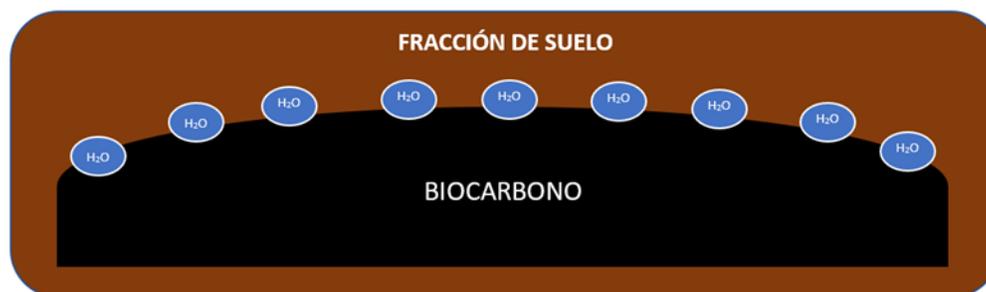
La agricultura moderna enfrenta el desafío creciente de la contaminación del suelo, lo que plantea serias preocupaciones para la seguridad alimentaria y el medio ambiente. En respuesta a esta crisis, el tamizado molecular utilizando bio carbono para la descontaminación del suelo, puede revolucionar la restauración del mismo. (Leveau et al., 2021).

El tamizado molecular con bio carbono puede reducir significativamente la concentración de insumos agrícolas en el suelo, al eliminarlos, el bio carbono promueve la actividad microbiana beneficiosa y mejora la disponibilidad de nutrientes para los cultivos, como ya se ha mencionado oportunamente. (Aponte y Soledad-Rodríguez, 2021).

### Optimización de la retención de agua con bio carbono

El bio carbono, con su estructura porosa, -como sabemos- puede retener agua y nutrientes en el suelo donde los insumos agrícolas han podido alterar las propiedades físicas y químicas del mismo. Esto puede resultar en la pérdida de agua por escorrentía y lixiviación, con la respectiva consecuencia de pérdida de disponibilidad de agua y degradación del suelo. Figura 5.

*Figura 5: Retención de agua en la estructura porosa del biocarbono*



*Autor: Santiago Mayorga*

Los suelos contaminados por insumos agrícolas tienden a tener una menor capacidad de retención de agua debido a la degradación de la estructura del suelo, la reducción de la infiltración y la compactación. (Vélez et al., 2022).

Al ser incorporado al suelo, el bio carbono actúa como una esponja, absorbiendo y reteniendo el agua en sus poros y cavidades, mejora la estructura del suelo al promover la formación de agregados estables y la reducción de la compactación, aumenta la infiltración y, reduce la erosión. (Salomón Barrezueta-Unda et al., 2022).

### **El papel del bio carbono en la estabilización de la materia orgánica**

El bio carbono ayuda a aumentar la materia orgánica, mejorar su estructura y capacidad de retención de nutrientes reduciendo su descomposición y pérdida por procesos de mineralización. (Reyes-Moreno et al., 2020). La degradación de la materia orgánica, ha llevado a la pérdida de nutrientes y disminución de la calidad del suelo. En este sentido el bio carbono puede utilizarse para estabilizar la materia orgánica. (Baltazar y Castro, 2020).

La materia orgánica es esencial para mantener la estructura y salud del suelo. Sin embargo, el monocultivo, el uso excesivo de agroquímicos y la labranza intensiva, la degrada. Esto deriva en la pérdida de nutrientes, disminución de retención de agua y erosión. (Lozano Reategui, 2023).

El bio carbono, cuando se incorpora al suelo, se libera lentamente, proporcionando un sustrato estable para la colonización microbiana y formación de agregados edáficos. (Mondragón-Sánchez et al., 2021).

Al sostener mayor cantidad de materia orgánica, equilibra los balances físico químicos en el suelo, evita la escorrentía superficial y sub superficial e impide que se afecte al recurso, por arrastre de materiales.(Pérez-Cabrera et al., 2021). El bio carbono aplicado directamente al suelo, mediante enmiendas orgánicas, en mezcla con fertilizantes de síntesis o, con una combinación de los dos, contribuye a sostener sistemas de cultivo, incluyendo anuales, bianuales, perennes y sistemas agroforestales. (Escobar y Carlosama, 2021).

### **Estimulación de la actividad microbiana**

Proporciona un ambiente favorable para el crecimiento de microorganismos beneficiosos, como bacterias, hongos y consorcios microbianos y, la ciclización de nutrientes, aumenta la disponibilidad de nutrientes para las plantas. (Álvarez Vargas, 2021).

El bio carbono, promueve el crecimiento y propagación de micro organismos como: *Bacillus subtilis*, *Trichoderma harzianum*, *Pseudomonas fluorescens*, *Azospirillum brasilense*, *Rhizobium*

leguminosarum, Mycorrhizae (arbuscular mycorrhizal fungi), Streptomyces spp., Azotobacter vinelandii, Actinobacteria, Penicillium spp. Lactobacillus spp. Beauveria bassiana Nostoc spp. Bradyrhizobium japonicum, entre otras. (Huerta De La Cruz, 2020).

Estos organismos, desempeñan una variedad de funciones vitales en el suelo. Especialmente de la fijación de nitrógeno, la mineralización de nutrientes y la degradación de contaminantes; por supuesto, de la capacidad de transformación de materiales del suelo en formas asimilables, como en el caso del fósforo. Además, los microorganismos del suelo contribuyen a la formación de agregados como la agrupación de la arena, limo y arcilla, retiene agua, mantiene una aireación adecuada y libera nutrientes. (Stadler-Kaulich y Hernando Perteguer, 2018).

Con su estructura porosa y alta superficie específica, proporciona un ambiente propicio para la colonización microbiana; como: bacterias, hongos, actinomicetos y otros. Estos microorganismos una vez en el suelo, se adaptan a las condiciones ambientales y comienzan a crecer y reproducirse, formando comunidades complejas. (Aponte y Soledad-Rodríguez, 2021).

La degradación microbiana o mineralización, implica una serie de reacciones bioquímicas que transforman los compuestos orgánicos complejos en formas más simples que pueden ser utilizadas por otros organismos, incluidos los nutrientes disponibles para las plantas. (Chávez-García, 2022). El proceso ocurre con una descomposición inicial, donde los microorganismos secretan enzimas extracelulares que rompen los polímeros orgánicos complejos como la celulosa, la lignina, los lípidos, las proteínas y los carbohidratos en unidades más pequeñas y solubles. Las reacciones clave incluyen la hidrólisis, que es la ruptura de enlaces químicos mediante la adición de agua. (Leveau et al., 2021).

Luego, sucede la mineralización, en esta fase, los productos solubles son absorbidos por los microorganismos y convertidos en compuestos inorgánicos simples como dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ), y sales minerales. Este proceso involucra varias reacciones metabólicas dentro de los microorganismos como: la respiración aeróbica, donde los microorganismos oxidan los compuestos orgánicos para obtener energía, liberando  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ . (Medina Orozco y Medina Orozco, 2018).

A continuación, ocurre la fermentación en condiciones anaeróbicas, ciertos microorganismos descomponen los compuestos orgánicos en productos como ácidos orgánicos, alcoholes y gases como metano ( $\text{CH}_4$ ) y  $\text{CO}_2$ . Después, pasamos a la nitrificación, aquí el amoníaco producido

durante la mineralización de proteínas y ácidos nucleicos es oxidado por bacterias nitrificantes a nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) y luego a nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ). (Vélez Azañero y Verona Falla, 2018).

Posteriormente, en correspondencia con las reacciones anteriores, pasan a la desnitrificación, en condiciones anaeróbicas, los nitratos pueden ser reducidos a gases nitrogenados como el óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) y el nitrógeno molecular ( $\text{N}_2$ ) por bacterias desnitrificantes. Esto, nos lleva, a la humificación, mineralización, humificación. Este proceso incluye la condensación y polimerización de subproductos de la descomposición, que son más recalcitrantes a la degradación microbiana. (Leveau et al., 2021).

Las reacciones bioquímicas clave en este proceso son:

Hidrólisis:  $\text{R-O-R}' + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{R-OH} + \text{R}'\text{-OH}$  (donde R y R' son grupos orgánicos).

Oxidación-reducción:  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2 \rightarrow 6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} + \text{energía}$  (respiración aeróbica).

Desaminación:  $\text{R-CH}(\text{NH}_2)\text{-COOH} \rightarrow \text{R-CO-COOH} + \text{NH}_3$  (degradación de aminoácidos).

Nitrificación:  $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$

Desnitrificación:  $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$

Como hemos visto, los microorganismos del suelo descomponen la materia orgánica en el suelo, liberando nutrientes esenciales disponibles para las plantas. El bio carbono proporciona un sustrato para estos microorganismos, acelerando el proceso de descomposición y mineralización de la materia orgánica. (Baltazar y Castro, 2020).

Algunos microorganismos del suelo son capaces de fijar nitrógeno atmosférico y convertirlo en formas disponibles. El bio carbono promueve la proliferación de estos microorganismos reduciendo la necesidad de fertilizantes nitrogenados. (Soto Espinosa et al., 2023).

El mecanismo de fijación biológica del nitrógeno, realizado por bacterias diazotróficas, poseen la enzima nitrogenasa, la fijación de N convierte el N atmosférico ( $\text{N}_2$ ), en amoníaco ( $\text{NH}_3$ ). (Middelanis, 2019).

El proceso de fijación biológica del nitrógeno ocurre en varias etapas, primero la asociación de la bacteria con la planta huésped, como Azotobacter y algunas cianobacterias, estas realizan la fijación de nitrógeno de manera independiente. En el caso de Rhizobium, estas forman nódulos en las raíces de las leguminosas, estos llevarán a cabo la fijación de N. (Pérez-Cabrera et al., 2021).

También por la producción y funcionamiento de la nitrogenasa, esta enzima, es un complejo enzimático sensible al oxígeno compuesto por dos proteínas: la dinitrogenasa y la dinitrogenasa reductasa. La reacción catalizada por la nitrogenasa es altamente demandante de energía y requiere

ATP y electrones. La reacción global de fijación del nitrógeno se puede simplificar como:  $N_2 + 8H^+ + 8e^- + 16ATP \rightarrow 2NH_3 + H_2 + 16ADP + 16P_i$

Otro mecanismo es la protección de la nitrogenasa que, es extremadamente sensible al oxígeno, que puede inactivar la enzima. En las bacterias de vida libre, como *Azotobacter*, se utilizan proteínas de alta afinidad por oxígeno y tasas respiratorias elevadas para consumir oxígeno rápidamente. Además, la leghemoglobina (una proteína similar a la hemoglobina en la sangre) en los nódulos captura el oxígeno y lo mantiene en niveles bajos. (Álvarez Vargas, 2021).

El amoníaco producido por la nitrogenasa, es rápidamente asimilado por las plantas en forma de aminoácidos. En una relación simbiótica, la planta proporciona productos de fotosíntesis (carbohidratos) a las bacterias, que son utilizados como fuente de energía para el proceso de fijación de nitrógeno. (Vélez et al., 2022).

Ejemplos de bacterias de vida libre fijadoras de nitrógeno: *Azotobacter*, *Clostridium*, cianobacterias (como *Anabaena*, *Nostoc*). Bacterias simbióticas: *Rhizobium* (con leguminosas), *Frankia* (con plantas actinorrícicas como *Alnus*). (Aponte y Soledad-Rodríguez, 2021).

Los microorganismos del suelo pueden degradar una variedad de contaminantes, incluyendo insumos agrícolas, hidrocarburos y metales pesados. La degradación se da por biotransformación, los microorganismos transforman compuestos químicos en formas menos tóxicas a través de procesos enzimáticos. Por mineralización, los pesticidas y herbicidas se descomponen en ( $CO_2$ ), agua ( $H_2O$ ) y sales minerales. Las enzimas catalizan reacciones de oxidación, reducción, hidrólisis y conjugación y, por co-metabolismo. (Vélez Azañero y Verona Falla, 2018).

La degradación de hidrocarburos (petrolíferos), se da por bioaumentación que, es la introducción de microorganismos específicos que tienen la capacidad de degradar hidrocarburos. Ejemplos incluyen *Pseudomonas*, *Bacillus* y *Mycobacterium*. Por bioestimulación, adicionando nutrientes (nitrógeno, fósforo) y condiciones adecuadas (oxígeno, pH) para estimular el crecimiento de microorganismos nativos que pueden degradar hidrocarburos. (Aquiye Ramos, 2019).

La enzima monooxigenasa introduce un átomo de oxígeno en el hidrocarburo, comenzando la oxidación y posterior descomposición. Finalmente, por metabolismo aeróbico y anaeróbico, en ambientes aeróbicos, los hidrocarburos se degradan a través de la respiración celular, produciendo  $CO_2$  y agua, mientras que, en ambientes anaeróbicos, se utilizan rutas diferentes como la reducción de sulfato o la metanogénesis. (Stadler-Kaulich y Hernando Perteguer, 2018).

La degradación de metales pesados por microorganismos estimulados bajo la presencia de biocarbono tiene cuatro etapas fundamentales. Primero por biosorción donde los microorganismos adsorben metales pesados a través de enlaces iónicos y covalentes. Las paredes celulares de bacterias, hongos y algas contienen grupos funcionales (como carboxilos, hidroxilos y amino) que se unen a los metales. Segundo, la bioacumulación, con microorganismos que incorporan metales pesados en sus células mediante sus vesículas o mediante proteínas de unión específicas como metalotioneínas. (Baltazar y Castro, 2020).

Tercero, por biotransformación los microorganismos transforman los metales en formas menos tóxicas o más inmovilizadas. Por ejemplo, la Fitorremediación asistida por microorganismos, las plantas, en simbiosis con microorganismos, pueden extraer metales pesados del suelo. Las bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) facilitan este proceso. (Segura-Chavarría, 2018).

### **Influencia del biocarbono con el pH del suelo**

El biocarbono influye en el pH del suelo mediante la neutralización de ácidos a través de reacciones químicas con minerales básicos que contiene, tales como carbonatos, bicarbonatos, óxidos y silicatos de calcio, potasio, magnesio y sodio. (Salomón Barrezueta-Unda et al., 2022).

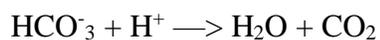
### **Neutralización de ácidos por carbonatos y bicarbonatos**

Carbonato de Calcio ( $\text{CaCO}_3$ ):

Cuando este se disuelve en el agua del suelo, puede reaccionar con los ácidos presentes (principalmente ácido carbónico formado por  $\text{CO}_2$  disuelto):

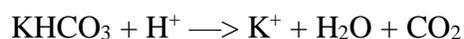


El ion bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) puede neutralizar los protones ( $\text{H}^+$ ), reduciendo la acidez:



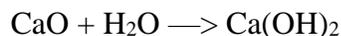
Mediante el bicarbonato de potasio ( $\text{KHCO}_3$ ):

De manera similar, el bicarbonato de potasio puede disociarse y reaccionar con ácidos:

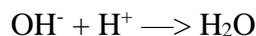
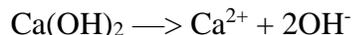


### **Neutralización de ácidos por óxidos**

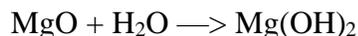
Óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ): Este reacciona con el agua para formar hidróxido de calcio:



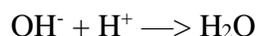
El hidróxido de calcio puede neutralizar protones en el suelo:



Óxido de Magnesio (MgO): Este reacciona con agua para formar hidróxido de magnesio:



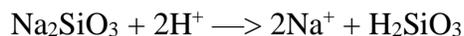
El hidróxido de magnesio neutraliza los protones:



### Reacciones con Silicatos

Silicato de Sodio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ):

Los silicatos pueden disolverse en agua y neutralizar ácidos mediante la formación de ácido silícico.



### Mecanismos de Acción

Estas reacciones se producen cuando el biocarbono es aplicado al suelo y se disuelve en la humedad presente. Los minerales alcalinos liberan iones que interactúan con los protones ( $\text{H}^+$ ) del suelo, neutralizando la acidez. La reacción con ácidos en el suelo libera agua y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), lo que reduce la concentración de protones libres y, por lo tanto, incrementa el pH del suelo. (Santamaria y Rossignoli, 2021).

El biocarbono, puede mejorar la capacidad de intercambio catiónico del suelo, lo que significa que puede adsorber y retener más cationes (como  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ) que pueden neutralizar la acidez del suelo. Una mayor CEC puede estabilizar el pH del suelo al proporcionar una reserva de cationes básicos que pueden intercambiarse con iones de hidrógeno ( $\text{H}^+$ ) en solución. (SALAS POZO, 2023).

El biocarbono, puede actuar como un buffer, moderando los cambios de pH en el suelo. Esto se debe a su estructura porosa y su alta superficie específica, que permite adsorber y liberar iones de manera controlada. Esto ayuda a mantener un pH más estable, resistiendo fluctuaciones bruscas

debidas a la aplicación de fertilizantes o la lixiviación de nutrientes. (Carrión Sánchez y Huaman Olmos, 2021).

Algunos microorganismos pueden producir compuestos alcalinos como amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) durante la descomposición de la materia orgánica, contribuyendo a aumentar el pH del suelo. En suelos ácidos, la solubilidad de metales tóxicos como aluminio ( $\text{Al}^{3+}$ ) puede ser alta, lo que contribuye a la acidez del suelo. El biocarbono puede adsorber estos metales, disminuyendo su disponibilidad y toxicidad, lo que indirectamente puede aumentar el pH del suelo. (Moreno-Riascos y Ghneim-Herrera, 2020).

El efecto específico del biocarbono en el pH del suelo dependerá de su origen y proceso de producción, la cantidad aplicada, las características iniciales del suelo (pH, textura y contenido de materia orgánica) y, condiciones ambientales ( $\text{H}^\circ$  y  $\text{T}^\circ$  del suelo). En suelos ácidos, la aplicación de biocarbono tiende a elevar el pH, mientras que, en suelos neutros o alcalinos, el impacto puede ser menos significativo o incluso neutral. (Chávez-García, 2022).

## **Reducción de la lixiviación y la escorrentía**

### **Mecanismos de Reducción de Lixiviación**

Como hemos visto, el biocarbono tiene una estructura porosa que aumenta la capacidad del suelo para retener agua. El agua se infiltra más lentamente y se almacena en el suelo, lo que reduce la cantidad de agua que se mueve a través del perfil del suelo y lleva consigo nutrientes solubles. Al incorporar biocarbono, se crea una estructura más estable que favorece la retención de agua y la infiltración en lugar de la lixiviación. Los agregados del suelo con biocarbono son más resistentes a la disgregación por el agua. (De La Cruz, 2022).

El biocarbono tiene una alta capacidad de adsorción debido a su gran superficie específica y su carga negativa. Esto permite que los nutrientes, como el nitrato y el fosfato, se adhieran a la superficie del biocarbono, lo que reduce su movilidad y la posibilidad de lixiviación. (Leveau et al., 2021).

### **Mecanismos de Reducción de la Escorrentía**

La estructura porosa del biocarbono mejora la capacidad del suelo para absorber el agua de lluvia. Esto aumenta la tasa de infiltración y reduce el volumen de agua superficial que se convierte en

escorrentía. Mejora la porosidad del suelo, disminuye la compactación permitiendo una mayor infiltración de agua y menos escorrentía. El biocarbono estabiliza la superficie del suelo, reduce la erosión y la formación de canales que aumentan la escorrentía. (Aquiye Ramos, 2019).

### **Beneficios Combinados**

Estos mecanismos combinados resultan en un suelo más estructurado y con una mayor capacidad para retener agua y nutrientes. Esto no solo mejora la eficiencia del uso del agua y los nutrientes en el suelo, sino que también disminuye el impacto ambiental negativo asociado con la lixiviación de nutrientes a los cuerpos de agua subterráneos y la escorrentía superficial que puede causar erosión y contaminación de las aguas superficiales. (Stadler-Kaulich y Hernando Perteguer, 2018).

### **Conclusiones**

El estudio minucioso de la literatura científica relacionada con el uso de bio carbono en la bio remediación de suelos agrícolas contaminados por insumos agrícolas reveló una serie de hallazgos significativos y tendencias emergentes que tienen importantes implicaciones para la práctica agrícola y la gestión ambiental.

La literatura científica proporciona evidencia sólida de que el bio carbono puede ser una herramienta efectiva para la bio remediación de suelos agrícolas contaminados por insumos agrícolas. Numerosos estudios han demostrado que la aplicación de bio carbono puede conducir a una reducción significativa en los niveles de contaminación por insumos agrícolas en el suelo, mejorando así la calidad del suelo y promoviendo un entorno más saludable para el crecimiento de los cultivos.

Se ha demostrado que el bio carbono influye en la degradación y mitigación de los insumos agrícolas en el suelo a través de una variedad de mecanismos subyacentes. Estos incluyen la adsorción de insumos agrícolas en la superficie del bio carbono, la estimulación de la actividad microbiana en el suelo, y la mejora de la calidad física y química del suelo, todos los cuales contribuyen a la reducción de la disponibilidad y la toxicidad de los insumos agrícolas en el suelo. La aplicación de bio carbono también se ha asociado con mejoras en la actividad microbiana del suelo, la adsorción de contaminantes y la calidad general del suelo en sistemas agrícolas contaminados. Estos efectos positivos pueden tener importantes implicaciones para la salud y la

productividad a largo plazo de los sistemas agrícolas, contribuyendo a la sostenibilidad y la resiliencia de la agricultura.

A pesar de los avances significativos en la investigación sobre el uso de bio carbono en la bio remediación de suelos agrícolas contaminados por insumos agrícolas, aún existen lagunas en nuestro conocimiento que requieren atención adicional. Se necesitan más estudios para comprender mejor los mecanismos subyacentes de acción del bio carbono, así como para evaluar su efectividad en una variedad de condiciones ambientales y agronómicas. Se recomienda que futuras investigaciones se centren en abordar estas lagunas y proporcionar orientación para mejorar las prácticas de bio remediación en la agricultura.

Los hallazgos de este estudio destacan el potencial del bio carbono como una herramienta prometedora para la bio remediación de suelos agrícolas contaminados por insumos agrícolas. Al continuar investigando y desarrollando en este campo, podemos avanzar hacia prácticas agrícolas más sostenibles y mitigar los impactos negativos de la contaminación por insumos agrícolas en el medio ambiente y la salud humana.

## Referencias

1. Álvarez Vargas, S. E. (2021). Evaluación de la calidad del biocarbón producido a través de restos de podas de tres especies forestales en fundación “La Iguana” ubicado en el cantón Guayaquil provincia del Guayas.
2. Aponte, G. M., y Soledad-Rodríguez, B. J. R. d. Q. (2021). Tendencias en el uso del biocarbón como acondicionador de suelos. 35(2), 44-51.
3. Aquije Ramos, C. A. (2019). Optimización de la agricultura sostenible mediante el uso del biocarbón en el Perú.
4. Armijos, J. M., Batista, C. R. M. G., y Barrezueta-Unda, C. S. J. R. C. A. (2018). Elaboración de biocarbón obtenido a partir de la cáscara del cacao y raquis del banano. 6(3), 75-81.
5. Baltazar, B. D. L., y Castro, D. J. L. J. P. U. (2020). Carbonización hidrotérmica de agua gris para obtener biocarbón libre de gérmenes. 17(1), 61-68.
6. Barrezueta-Unda, S., Condoy Gorotiza, A., y Sanchez Pilcorema, S. J. E. U. (2022). Efecto del biocarbón en el desarrollo de las plantas de banano (*Musa AAA*) en fincas a partir de un manejo orgánico y convencional. 13(3), 29-44.

7. Barrezueta-Unda, S., Rizzo-Muñiz, J., y Loaiza, H. A. J. C. y. A. (2022). Efecto del abono orgánico con biocarbón sobre las características morfológicas de mazorca de *Theobroma cacao* CCN51. 19(2), 1-12.
8. CABRERA, C. A. P. (2021). Biocarbón de cascarilla de arroz y ápices de caña de azúcar en el crecimiento de lechuga, albahaca y pepino.
9. Carrión Sanchez, K. T., y Huaman Olmos, M. (2021). Uso de biocarbón para la disminución de emisiones de dióxido de carbono en la agricultura: revisión sistemática.
10. Chanalata, J. G., Unda, S. B., y Paredes, D. C. (2022). Construcción y validación de un reactor de pirólisis para la obtención de biocarbón: Construction and testing of a pyrolysis reactor for the production of biochar. Conference Proceedings (Machala),
11. Chávez-García, E. J. C., Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería. (2022). Carbón mineral y biocarbón: de la revolución industrial a la captura de carbono. (123), 15-28.
12. De La Cruz, A. J. H. J. A. S. (2022). Influencia del biocarbón elaborado con residuos sólidos orgánicos sobre la calidad y producción del cultivo de la papa en el Centro Experimental Ecológico de Tuyu Ruri. 15(1), 149-163.
13. Delgado, J., Echezuría, H., Soledad, B., López, M., y Muñiz, R. (2019). Desarrollo de una propuesta para el uso del biocarbón, obtenido a partir de la pirólisis del bambú, como una tecnología apropiable en la agricultura familiar.
14. Escobar, T. C. P., y Carlosama, A. R. J. A. I. e. I. (2021). Impacto del biocarbón en el suelo agrícola. 18(2).
15. García, W. E. V., Feijoo, J. G. A., y Delgado, I. R. J. R. C. A. (2023). Efecto combinado de fertilización química y Biochar en crecimiento y desarrollo del cultivo de Maíz *Zzea Mays* l. 11(3), 29-35.
16. Hernández, M. G. R., Fuentes, E. G., y Hernández, N. H. (2024). Investigación e innovación relacionadas con el uso agrícola del biocarbón: dos casos de estudio cubanos: VIII Taller Internacional “Universidad, Seguridad y Soberanía Alimentaria”. Congreso Universidad,
17. Huerta De La Cruz, A. J. (2020). Influencia del biocarbón elaborado con residuos sólidos orgánicos sobre la calidad y producción del cultivo de la papa en el centro experimental ecológico de Tuyu Ruri, noviembre 2018 a abril 2019.

18. Leveau, M., Dumler, S., Anaya De La Rosa, R., Alegre, J., y Ladd, B. J. E. A. (2021). Uso de biocarbón en el balance de nitrógeno en suelos aluviales de San Ramón/Chanchamayo/Perú. 20(2), 179-188.
19. López, M. I., Soledad, B., Echezuría, H., y Delgado, J. J. T. (2020). Evaluación de las características físicas del biocarbón obtenido por el Centro de Investigación y Desarrollo de Ingeniería de la UCAB. 23(2).
20. Lozano Reategui, R. M. (2023). El Biocarbón enriquecido para la producción sostenible de sistemas de cultivos en Ucayali.
21. Medina Orozco, L. E., y Medina Orozco, I. N. J. T. L. (2018). Prototipo autotérmico móvil para producción de biocarbón con biomasa de esquilmos de aguacate. 36(2), 121-129.
22. Middelanis, T. J. A. N. (2019). El biocarbón aplicado al suelo retiene agua y nutrientes en los valles interandinos del Departamento de Cochabamba, Bolivia. 9(3), 429-449.
23. Mondragón-Sánchez, A., Medina-Orozco, L. E., Sánchez-Duque, A., y Núñez-Oregel, V. J. T. L. (2021). Efecto de la aplicación de biocarbón en el rendimiento de maíz en Michoacán, México. 39.
24. Moreno-Riascos, S., y Ghneim-Herrera, T. (2020). Impacto del uso del biocarbón sobre la producción agrícola y el cambio climático. Una revisión.
25. Pérez-Cabrera, C. A., Juárez-Lopez, P., Anzaldo-Hernández, J., Alia-Tejacal, I., Salcedo-Pérez, E., y Balois-Morales, R. J. R. m. d. c. a. (2021). Beneficios potenciales del biocarbón en la productividad de cultivos agrícolas. 12(4), 713-725.
26. Reyes-Moreno, G., Cuervo-Andrade, J. L., Darghan-Contreras, A., y Cárdenas-Pardo, N. J. J. A. C. (2020). Impacto de lodos secos y biocarbón de lodos sobre la altura y materia seca de *Solanum lycopersicum* L. 38(2), 233-243.
27. Salami, M. F., Mark, M., Ibitomi, O., Osasona, K. K., Adeniyi, V., Salami, S., y Sulaiman, H. J. P. J. o. A. (2023). Optimizando el uso del Biocarbón en la producción de Okra (*Abelmoschus esculentus* L.) en Nigeria. 7(1), 20-26.
28. SALAS POZO, V. (2023). APLICACIÓN DE BIOCARBÓN OBTENIDO DE RESIDUOS DE PALMA DE ACEITE PARA EL MEJORAMIENTO DE LAS COMPOSTAS.

29. Santamaria, J. A., y Rossignoli, C. E. (2021). Efecto de la aplicación de biocarbón sobre propiedades químicas de suelo y desarrollo y rendimiento de lechuga Zamorano: Escuela Agrícola Panamericana, 2021].
30. Segura-Chavarría, D. M. (2018). Control de calidad de biocarbón para la producción de Terra Preta.
31. Soto Espinosa, P. A., Tenelanda Masache, C. R., y Amaya Rivas, A. (2023). Análisis de factibilidad de una enmienda de suelo a base de biocarbón para banano orgánico ESPAE-ESPOL].
32. Stadler-Kaulich, N., y Hernando Perteguer, A. J. A. N. (2018). Más Allá de la agroforestería. El biocarbón activado y la madera rameal fragmentada: utilización y preparación en Mollesnejta. 8(4), 572-592.
33. Velez Azañero, A. J., y Verona Falla, J. M. J. (2018). Influencia de enmienda orgánica" inkan negro" a partir de biocarbón y gallinasa, en la optimización de la agricultura sostenible.
34. Vélez, D. A. R., Unda, S. B., y Aguilar, E. J. J. R. M. d. C. A. (2022). Enmiendas edáficas de biocarbones y SiO<sub>2</sub> en plantas de banano con manejo de agricultura orgánica. 5(3), 113-123.

© 2024 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).