

Mejoramiento de suelos degradados aplicando biocarbón, distrito El Milagro, Utcubamba, Amazonas

Improvement of degraded soils by applying biochar, El Milagro district, Utcubamba, Amazonas

Vergara, Gino Alfredo^{1,2*}; Flores, Jorge Enrique²

¹Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Chachapoyas, Perú

²Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, Perú

Recibido: 21/08/2025 | Aceptado: 07/09/2025 | Publicado: 18/12/2025

Correspondencia*: gavergaram@unitru.edu.pe

RESUMEN

Para mejorar la fertilidad de un suelo degradado se puede usar diversas técnicas, siendo crucial a considerar los contaminantes presentes, las características del suelo y los costos de tratamiento. Entre las alternativas se encuentran la incorporación de materia orgánica, la eliminación, estabilización y la aplicación de biocarbón. Esta investigación evaluó el impacto del biocarbón en la calidad de suelos, de la cual se aplicó a quince muestras distribuidas en tratamientos al 5, 10 y 15% en períodos de 40, 35 y 30 días. El análisis inicial se tomó de un suelo agrícola de 200 m², que se dividió en 20 parcelas de 10 m², se seleccionó 5 parcelas las cuales se subdividieron en microparcelas de 1m² a una profundidad de 30 cm, se evidenció una baja concentración de nutrientes como Carbono, Nitrógeno y materia orgánica principalmente, posteriormente se preparó el biocarbón a base de residuos orgánicos y se aplicaron las dosis en las muestras de suelo. Los resultados demuestran que la mayor efectividad fue con el tratamiento de biocarbón al 15%, mejorando la calidad del suelo. Finalmente, la investigación muestra que la aplicación de biocarbón en suelos degradados no solo mejora su calidad, también contribuye a la sostenibilidad ambiental mediante la valorización de residuos orgánicos.

Palabras clave: Biocarbón; biomasa residual; calidad de suelo; suelo degradado; valorización de residuos

ABSTRACT

To improve the fertility of degraded soil, various techniques can be used. It's crucial to consider the pollutants present, the soil's characteristics, and treatment costs. Alternatives include the incorporation of organic matter, removal, stabilization, and the application of biochar. This research evaluated the impact of biochar on soil quality. Fifteen samples distributed in treatments with biochar at 5%, 10% and 15% concentrations for periods of 40, 35 and 30 days. The initial analysis was taken from a 200 m² agricultural plot, which was divided into 20 plots of 10 m². From these, 5 plots were selected and subdivided into 1m² microplots at a depth of 30 cm. The analysis showed a low concentration of nutrients, mainly Carbon, Nitrogen and organic matter. Subsequently, biochar was prepared from organic waste and applied to soil samples. The results demonstrate that the most effective treatment was with 15% biochar, which improved soil quality. Finally, the research shows that applying biochar to degraded soil not only improves its quality but also contributes to environmental sustainability by repurposing organic waste.

Keywords: Biochar; residual biomass; soil quality; degraded soil; waste recovery

Cómo citar este artículo: Vergara, G. A. & Flores, J. E. (2025). Mejoramiento de suelos degradados aplicando biocarbón, distrito El Milagro, Utcubamba, Amazonas. *Revista Científica Dékamu Agropec*, 6(2), 01-10.
<https://doi.org/10.55996/dekamuagropec.v6i2.369>

1. INTRODUCCIÓN

El suelo es un recurso natural formado por minerales, materia orgánica, aire y agua (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2022), el cual se ha constituido a lo largo del tiempo por la descomposición de rocas, la actividad biológica y la influencia de diversos factores naturales (Kabir et al., 2023). Está sujeto a degradación por la actividad humana (agricultura intensiva), disminuyendo su calidad y capacidad para sustentar los ecosistemas (Bolan et al., 2024). Actualmente, el 75% de la tierra en el planeta está degradado (Evizal & Prasmatiwi, 2023), y, según el Atlas Mundial de la Desertificación se estima que, si no se implementa medidas preventivas para cuidar el suelo, su degradación llegará a un 90% al año 2050 (UNESCO, 2024). Además, Marqués (2022) señala que las actividades agrícolas, ganaderas y la industria sumada a ello el crecimiento poblacional y desarrollo urbanístico son las principales causas de la degradación del suelo; por tanto, es necesario fomentar la protección del suelo mediante gestiones sostenibles, para preservar el ecosistema, la biodiversidad, regular el clima, producir alimentos y purificar el recurso hídrico (Rex et al., 2023).

Por otra parte, la gestión de residuos en nuestro país es deficiente, lo que representa un riesgo la salud y el ambiente debido a la presencia de focos infecciosos, filtración de lixiviados y contaminación de recursos (Valdivia-Espinoza & Guardia-Muguruza, 2023). El Banco Mundial (2018), señala que la generación de residuos sólidos se intensifica por el crecimiento urbano y poblacional, estableciendo que la cantidad de residuos se incrementará hasta en un 70 % (de 2010 en el año 2016 hasta 3400 millones de toneladas al año 2050). En nuestro país se genera un promedio anual mayor a 8 millones de toneladas, y se valoriza aproximadamente solo 148 500 toneladas (Ministerio del Ambiente, 2024). Aquellos residuos que no pueden ser valorizados deben tener como destino final su disposición en rellenos sanitarios, en condiciones técnicas y sanitarias adecuadas que minimice los impactos al ambiente y salud de las personas, sin embargo, ante la falta de estas infraestructuras, gran cantidad de residuos generados se dispone inadecuadamente en botaderos.

En ese sentido, ante la falta de infraestructuras para la disposición final de desechos sólidos y el incremento de botaderos, la valorización de residuos sólidos es una alternativa de gestión que permitirá reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y las cantidades que requieren disposición, por ejemplo, en la sustitución de componentes en distintos procesos antrópicos, aprovechando su potencial energético (Valdivia-Espinoza & Guardia-Muguruza, 2023). Es importante implementar estrategias de gestión que involucre el aprovechamiento de residuos y la mejora de suelos como las enmiendas orgánicas, micorrizas, uso de biocarbón, entre otros (Guo, 2020). El biocarbón se obtiene mediante conversión termoquímica de restos orgánicos sin presencia de oxígeno y constituye una alternativa para minimizar los residuos que genera las actividades industriales, logrando un impacto positivo al ambiente (Díaz Vento et al., 2022), asimismo, su uso aporta beneficios tanto en la regeneración de suelos como a mitigar el cambio climático (Akimenko et al., 2021).

Existen investigaciones que sustentan la eficiencia del biocarbón en la rehabilitación de suelos, Sharma & Chhabra (2024) investigó las diversas aplicaciones y beneficios del biocarbón en las prácticas agrícolas, pudiendo evidenciar que su uso en la agricultura es importante para optimizar las propiedades del suelo; contribuyendo a retener nutrientes, mejora su fertilidad y, por ende, mejora el rendimiento de cultivos en su crecimiento y productividad.

Por otro lado, Murtaza et al. (2023) señalan que el uso de biocarbón es una alternativa viable para la remediación de suelos, destacando su capacidad en la remoción de metales pesados y contaminantes orgánicos. Asimismo, resalta la influencia de las tasas de aplicación y las condiciones de operación como factores que inciden en la eficiencia de la remediación concluyendo que es

importante seleccionar adecuadamente la materia prima y las condiciones óptimas de operación ayudarían a obtener un biocarbón para el tratamiento de contaminantes específicos.

Pérez-Cabrera et al. (2022) evaluaron el efecto del biocarbón obtenido a partir de residuos de cañamiel en el desarrollo de la albaca tailandesa, realizando 4 tratamientos proporcionales en 33 días, cuyos resultados demostraron mejora en el rendimiento del cultivo evidenciado en su crecimiento. Mondragón-Sánchez et al. (2021) analizaron el uso de biocarbón obtenido de residuos de la corona de maíz usando un reactor de atmósfera inerte, en el rendimiento del maíz comercial, realizó el tratamiento mecánico de trituración al suelo y dosificaciones al 1 y 2% de biocarbón, además de una muestra control, utilizando un diseño de bloques al azar con 4 repeticiones de 9 m². Los resultados muestran un incremento en el rendimiento del cultivo y el aumento del tamaño en las variables agronómicas del maíz (peso de mazorca, tamaño de grano, etc.), demostrando que el biocarbón es una buena alternativa para el mejoramiento de suelos y, por ende, contribuye en la mejora de la producción agrícola.

El presente estudio busca promover la valorización de residuos sólidos como alternativa de gestión, mediante su uso para obtener biocarbón y su aplicación en suelos degradados, evaluando su eficiencia en la mejora de su calidad.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en el distrito El Milagro, provincia de Bagua, región Amazonas en la ruta Bagua - Jaén, colindante a la carretera Fernando Belaúnde Terry, en el predio denominado “El Fundo”.

El suelo agrícola de donde se obtuvieron las muestras estuvo conformado por un área de 200 m² que se dividió en 20 parcelas de 10 m² (5 m x 2 m) cada uno, de las cuales se seleccionó 5 de ellas y subdividieron en microparcelas de 1 m² seleccionando al azar 5 para cada tratamiento, con la finalidad de poder replicarlo y aumentar el nivel de confiabilidad de los datos obtenidos, a una escala más representativa.

Se utilizó 15 muestras de suelo para los tratamientos, donde se aplicó dosificaciones de biocarbón en forma proporcional (5, 10 y 15%) en tiempos de reposo de 40, 35 y 30 días, además de las muestras control (sin tratamiento). Las muestras inicialmente fueron sometidas a análisis físico químico, por otro lado, se recolectó y seleccionó residuos orgánicos procedente del mercado local para preparar biocarbón mediante el proceso de pirólisis, que fue caracterizado y aplicado en las muestras del suelo, finalmente se sometió a tratamiento con biocarbón y se procedió al análisis de los resultados.

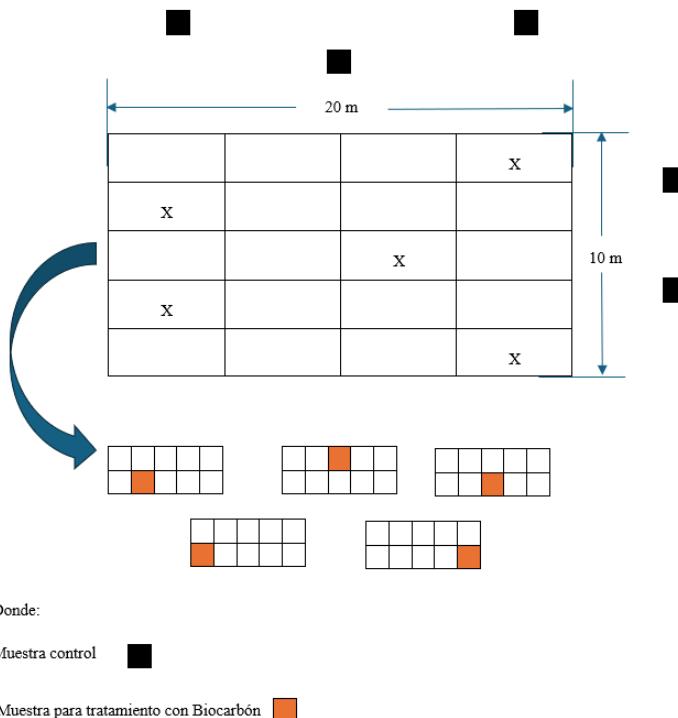


Figura 1. Distribución de la muestra para análisis del tratamiento con biocarbón

Para el diagnóstico de la calidad de suelo, se tomó muestras de suelo según lo establecido por Ministerio del Ambiente (2014) se sometió a tratamiento mecánico y luego se realizó el análisis físico químico para determinar materia orgánica, Carbono orgánico, Nitrógeno, Fósforo, Potasio, pH y conductividad eléctrica.

Por otro lado, se recolectó selectivamente residuos orgánicos en zonas aledañas al mercado local, identificados de la siguiente manera:

BR1: leña y hojas secas

BR2: cáscara de plátano, yuca, alverja y cascarilla de arroz

BR3: cáscara de coco

Los desechos orgánicos usados para preparar el biocarbón, se sometieron previamente a un proceso de secado solar y trituración, luego se agregó aproximadamente 1 kg de biomasa que fue sometido a pirólisis en un horno mufla por aproximadamente 5 horas. Se obtuvo aproximadamente 300 – 400 gr de biocarbón, el cual fue caracterizado en porcentaje de carbono, hidrógeno y, nitrógeno principalmente (Iglesias-Abad et al., 2020), con los resultados del diagnóstico, se aplicó biocarbón en proporciones de 5, 10 y 15% en peso a las muestras de suelo obtenidas dejándose en reposo durante 40, 35 y 30 días respectivamente (Condeña Naveta, 2017), luego del cual las muestras fueron llevadas a laboratorio para determinar el valor de los parámetros físico químicos, y evaluar la eficiencia del tratamiento.

Para realizar la evaluación del efecto y determinar la variación en función del tiempo (días) y las concentraciones de biocarbón mediante análisis estadístico, y poder analizar su efecto en la calidad de suelo agrícola, se tiene que considerar dos escenarios: la normalidad de errores del modelo aplicando la prueba de Shapiro- Wilk y homogeneidad de varianza mediante las pruebas de Levane.

Se estableció niveles para los factores de tratamiento y tiempo de reposo, se realizó el análisis de varianza (ANOVA), el bifactorial para evaluar la significancia de los tratamientos efectuados y el tiempo.

Asimismo, se empleó la prueba de comparación múltiple Tukey para evaluar el tratamiento que mejore significativamente la calidad del suelo. Para realizar la evaluación del efecto y determinar la variación en función del tiempo (días) y las concentraciones de biocarbón mediante análisis estadístico con el software SPSS 25.0.

3. RESULTADOS

3.1. Análisis físico químico del suelo

La tabla 1 muestra los valores de parámetros fisicoquímicos de la muestra de suelo sin tratamiento (muestra control), que sirvió como referencia para analizar el nivel de degradación de suelo y el tratamiento con biocarbón. En el caso del pH se encuentra en valores entre 8,19 y 8,47; la conductividad eléctrica oscila entre 0,14 a 0,30 dS/m. Asimismo se muestra los valores porcentuales de C y materia orgánica y para los otros elementos (P, K, N) en partes por millón (ppm) en valores relativamente bajos.

Tabla 1. Análisis físico químico de suelo agrícola sin tratamiento

Muestra	pH (1:1)	C.E. (dS/m)	P (ppm)	K (ppm)	C (%)	M.O. (%)	N (ppm)
Control	8,30	0,14	2,56	77,00	1,98	2,45	12,70
	8,19	0,30	2,37	83,00	2,60	3,50	11,90
	8,38	0,15	3,67	80,00	2,15	3,01	13,20
	8,44	0,17	2,66	88,00	2,56	3,69	12,70
	8,47	0,27	2,00	70,00	1,45	2,21	13,70

En la tabla 2 se presentan los valores de caracterización del biocarbón obtenido a partir de residuos orgánicos en tres tratamientos (BR1, BR2 y BR3). Los resultados muestran que el pH del biocarbón es alcalino, con valores que varían entre 8,95 y 10,20. La conductividad eléctrica (C.E.) fue elevada en los tres tratamientos, registrándose entre 1270 y 1350 dS/m, lo que indica una alta concentración de sales solubles. El contenido de humedad fue bajo, oscilando de 1,58 % a 2,81 %.

En cuanto a la composición elemental, el carbono presentó valores altos (72 - 89%), mientras que el hidrógeno se mantuvo entre 7,10% y 7,60%. El nitrógeno fue más bajo, con un rango de 1,60 % a 3,90 %, y el oxígeno se situó entre 12,00% y 13,00 %. Finalmente, el contenido de azufre fue reducido, con valores entre 0,58% y 0,90%.

Tabla 2. Caracterización del biocarbón

Parámetros	BR 1	BR 2	BR 3
pH	9,01	8,95	10,20
C.E. (dS/m)	1270,00	1290,00	1350,00
% Hum	2,58	1,58	2,81
% C	72,00	89,00	72,00
% H	7,30	7,60	7,10
% N	1,60	2,00	3,90
% O	12,00	13,00	12,60
% S	0,90	0,81	0,58

La tabla 3 presenta los resultados de la normalidad de errores y homogeneidad de varianzas a un nivel de significancia del 5% para los valores de pH, C.E., P, K, C, M.O. y N mediante las pruebas de Ryan - Joiner y Levene, usando el software SPSS 25.0

Tabla 3. Supuesto de normalidad de errores y homogeneidad de varianzas

Variable	Prueba	Valor de p	Conclusión
pH	Ryan-Joiner	> 0,100	Los errores del modelo siguen una distribución normal
	Levene	0,830	las varianzas de los pH por tratamiento entre grupos son iguales
C.E.	Ryan-Joiner	> 0,100	Los errores del modelo siguen una distribución normal
	Levene	0,564	Las varianzas de los C.E por tratamiento entre grupos son iguales
P		< 0,100	Los errores del modelo siguen una distribución normal
	Ryan-Joiner	> 0,100	que los errores del modelo siguen una distribución normal
K		0,314	Las varianzas de los niveles de potasio por tratamiento entre grupos son iguales
	Levene	< 0,100	Los errores del modelo siguen una distribución normal
M.O.		< 0,100	Los errores del modelo siguen una distribución normal
	Ryan-Joiner	> 0,100	Los errores del modelo siguen una distribución normal

La tabla 4 presenta los valores promedio de pH y conductividad eléctrica (C.E.) obtenidos en suelos enmendados con diferentes proporciones de biocarbón (0 %, 5 %, 10 % y 15 %), con cinco repeticiones por tratamiento (N=5). En relación con el pH, se observa un incremento progresivo conforme aumenta la proporción de biocarbón, alcanzando el valor máximo con el 15 % de aplicación (9,038), el cual difiere estadísticamente del resto de tratamientos y conforma el grupo A. Los tratamientos con 10 %, 5 % y 0 % de bio-carbón mostraron valores promedio inferiores (8,494; 8,150 y 8,356, respectivamente)

En cuanto a la C.E., se evidencia un incremento asociado a la adición de biocarbón. El valor más alto se registró con 15 % de biocarbón (2,400; grupo A), seguido por el 5 % (1,090; grupo B-C) y el 10 % (0,838; grupo B). El valor más bajo se observó en el tratamiento control (0 %, 0,206; grupo C).

Tabla 4. Análisis estadístico de suelo en relación a pH y conductividad eléctrica

% Biocarbón	N	pH		C.E.	
		Media	Agrupación	Media	Agrupación
15	5	9,038	A	2,400	A
10	5	8,494	B	0,838	B
5	5	8,150	B	1,090	B C
0	5	8,356	B	0,206	C

La tabla 5 presenta los valores promedio de potasio (K) y nitrógeno (N) en suelos tratados con diferentes porcentajes de biocarbón (0 %, 5 %, 10 % y 15 %), considerando cinco repeticiones por tratamiento (N=5). En relación con el K, se observa un aumento significativo conforme se incrementa la dosis de biocarbón. El valor más alto se registró con la aplicación del 15 % (97,60), seguido por el 10 % (94,80), ambos pertenecientes al grupo A, sin diferencias estadísticas entre ellos. En contraste, los tratamientos con 5 % (84,80) y 0 % (79,60) mostraron valores significativamente menores, agrupados en la categoría B.

En cuanto al N, el mayor valor promedio se observó con la aplicación del 15 % de biocarbón (15,08), seguido del 5 % (14,62), ambos estadísticamente distintos (grupos A y B, respectivamente). El tratamiento con 10 % (13,94) no presentó diferencias significativas respecto al control (12,84), ambos agrupados en la categoría B.

Tabla 5. Análisis estadístico de suelo en relación Potasio y Nitrógeno

% Biocarbón	N	K		N	Agrupación
		Media	Agrupación		
15	5	97,60	A	15,08	A
10	5	94,80	A	13,94	A
5	5	84,80	B	14,62	B
0	5	79,60	B	12,84	B

La tabla 6 muestra los valores promedio de fósforo (P), carbono (C) y materia orgánica (M.O.) en suelos tratados con diferentes porcentajes de biocarbón (0 %, 5 %, 10 % y 15 %). Se observa que el contenido de P se incrementa progresivamente con la aplicación de biocarbón, pasando de 2,56 en el control a 3,83 en el 15 %, con un aumento consistente en la clasificación y en los valores de Z. En el caso del C, los valores se incrementan desde 2,15 (0 %) hasta 2,39 (15 %), destacando los mayores aportes a partir del 10 %. Por su parte, la M.O. también muestra una tendencia creciente, desde 3,01 en el control hasta 4,93 con 15 % de biocarbón, lo que representa un aumento significativo en comparación con el tratamiento sin aplicación.

Tabla 6. Calidad de suelo en relación al Fósforo, Carbono y materia orgánica (N=5)

Tratamiento	P			C			M.O.		
	Media	Clasificación	Z	Media	Clasificación	Z	M e di a	Clasificación	
0	2,56	5,40	- 2,23	2,15	9,60	- 0,39	3, 0 1	3,00	-3,27
5	2,81	6,60	- 1,70	2,13	7,10	- 1,48	4, 0 1	8,00	-1,09
10	3,58	12,00	0,65	2,30	11,50	0,44	4, 6 1	13,30	1,22
15	3,83	18,00	3,27	2,39	13,80	1,44	4, 9 3	17,70	3,14
General					10,50			10,50	

4. DISCUSIÓN

Tras realizar la enmienda del suelo con Biocarbón este presentó un efecto positivo en la mayoría de los parámetros evaluados. Si bien, se observó que los tratamientos con mayor dosis (15%), aumentó el pH confirmando de este modo el carácter alcalino del material, en concordancia con los resultados reportados por (Iglesias-Abad et al., 2020). Este efecto sería positivo en suelos ácidos, aunque en condiciones de alcalinidad elevada podría disminuir la disponibilidad de muchos micronutrientes, así como también alterar el microbiota del suelo (Escalante Rebollo et al., 2016).

Por otro lado, respecto a la conductividad eléctrica, se reportó un incremento en la dosis con el 15 % de Biocarbón lo que indicaría que este aporta en gran medida sales solubles al suelo. Si bien, estos valores mantuvieron un rango aceptable, conviene tomar en cuenta que a dosis más altas podría presentar un riesgo de salinidad al suelo, lo cual cambiaría las características de este y podría llegar a estropear la enmienda (Fasabi Cántaro, 2023).

Los resultados también evidencian un incremento del contenido de potasio (K) y nitrógeno (N) en los suelos tratados con dosis de 10 y 15 % de Biocarbón, Mondragón-Sánchez et al. (2021); Luo et al. (2020) quienes en sus estudios realizados destacan la capacidad que presenta el Biocarbón para potenciar la disponibilidad y retención de nutrientes en el suelo. Asimismo, el incremento progresivo

de fosforo, carbono y materia orgánica observado en el estudio coincide con lo señalado por Pérez-Cabrera et al. (2022) lo que confirmaría que el uso de Biocarbón en suelos degradados favorece en gran medida su recuperación mediante el incremento de nutrientes en este.

Finalmente, los hallazgos respaldan el gran potencial del biocarbón como enmienda de suelos degradados ya que mejoran notablemente la calidad de estos, devolviéndoles sus características y potenciando la disponibilidad de nutrientes, así mismo, se consideraría una estrategia de valorización de residuos orgánicos para la generación de Biocarbón, aprovechándolos para dar solución a la problemática de los suelos degradados (Murtaza et al., 2023; Bolan et al., 2024).

CONCLUSIONES

La aplicación de biocarbón generó incrementos significativos en el pH y en la conductividad eléctrica (C.E.), siendo el 15%, la dosis más efectiva, lo que evidencia su capacidad de modificar la reacción del suelo y aumentar la disponibilidad de sales solubles. En relación con los nutrientes, el biocarbón permite favorecer de manera positiva la disponibilidad de potasio (K), mientras que el nitrógeno (N) solo presentó un incremento significativo. El contenido de fósforo (P), carbono (C) y materia orgánica (M.O.) mostró una tendencia creciente con el aumento de biocarbón, alcanzando los valores máximos, lo que confirma su contribución a la fertilidad del suelo. La valorización de residuos sólidos a través de la producción de biocarbón representa una alternativa viable de gestión ambiental, con efectos positivos en la calidad de suelos degradados.

La aplicación de biocarbón obtenido de residuos sólidos no solo contribuye a la mejora de propiedades químicas del suelo (pH, C.E., nutrientes y materia orgánica), sino que también constituye una estrategia sostenible de manejo y valorización de residuos.

FINANCIAMIENTO

Los autores no recibieron ningún patrocinio para llevar a cabo este estudio-artículo.

CONFLICTO DE INTERESES

No existe ningún tipo de conflicto de interés relacionado con la materia del trabajo.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización, Curación de datos, Análisis formal, Investigación, Metodología, Software, Redacción - borrador original, Redacción - revisión y edición: Vergara, Gino Alfredo & Flores, Jorge Enrique

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akimenko, A., Masyutenko, N., & Dudkina, T. (2021). The use of natural resources and reproduction of soil fertility in obtaining a given quantity of products. *BIO Web of Conferences*, 32, 02006. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20213202006>
- Banco Mundial. (2018). Los desechos: un análisis actualizado del futuro de la gestión de los desechos sólidos. In *Banco Mundial*. <https://www.bancomundial.org/es/news/immersive-story/2018/09/20/what-a-waste-an-updated-look-into-the-future-of-solid-waste-management>
- Bolan, S., Sharma, S., Mukherjee, S., Kumar, M., Rao, C. S., Nataraj, K. C., Singh, G., Vinu, A., Bhowmik, A., Sharma, H., El-Naggar, A., Chang, S. X., Hou, D., Rinklebe, J., Wang, H., Siddique, K. H. M., Abbott, L. K., Kirkham, M. B., & Bolan, N. (2024). Biochar modulating soil biological health: A review. *Science of The Total Environment*, 914, 169585.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169585>

Condeña Naveta, E. A. (2017). Recuperación de suelos contaminados con plomo mediante el uso de biocarbón de bagazo de caña de azúcar en el parque Chota del AA.HH Ramón Castilla – Callao 2017. *Universidad César Vallejo*, 90.

Díaz Vento, I., Ancco, M., Peña Davila, G., Ancco-Loza, R., Davila Del-Carpio, G., & Jiménez Pacheco, H. G. (2022). Efectos del biocarbón obtenido a partir de residuos agrícolas de uva en la generación de biogás. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 24(4), 278–288. <https://doi.org/10.18271/ria.2022.423>

Escalante Rebollo, A., Pérez López, G., & Hidalgo Moreno, C. (2016). Biocarbón (biochar) I : Naturaleza , historia , fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoamericana*, 34, 367–382.

Evizal, R., & Prasmatiwi, F. E. (2023). Biochar: Pemanfaatan dan Aplikasi Praktis. *JURNAL AGROTROPIKA*, 22(1), 1. <https://doi.org/10.23960/ja.v22i1.7151>

Fasabi Cántaro, I. Y. (2023). *Efecto de la incorporación del biochar de origen orgánico (cascarilla de arroz) en la calidad del suelo agrícola contaminado, Colpa Baja, Huánuco*, 2022.

Guo, M. (2020). The 3R Principles for Applying Biochar to Improve Soil Health. *Soil Systems*, 4(1), 9. <https://doi.org/10.3390/soilsystems4010009>

Iglesias-Abad, S., Alvarez-Vera, M., & Salas, C. (2020). Biochar of residual biomass from eucalyptus (*Eucalyptus globulus*) by two pyrolysis methods. *Manglar*, 17(2), 105–111. <https://doi.org/10.17268/manglar.2020.016>

Kabir, E., Kim, K.-H., & Kwon, E. E. (2023). Biochar as a tool for the improvement of soil and environment. *Frontiers in Environmental Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1324533>

Luo, C., Yang, J., Chen, W., & Han, F. (2020). Effect of biochar on soil properties on the Loess Plateau: Results from field experiments. *Geoderma*, 369, 114323. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114323>

Marqués, M. J. (2022). El suelo agrícola, una perspectiva histórica de su degradación y la oportunidad de contribuir a la mitigación del cambio climático. *Revista Española de Desarrollo y Cooperación*, 48, 35–56. <https://doi.org/10.5209/redc.81175>

Ministerio del Ambiente. (2014). *Guía para muestreo de suelos*. 38. http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2014/04/GUIA-MUESTREO-SUELO_MINAM1.pdf

Ministerio del Ambiente. (2024). *Más de 148 500 toneladas de residuos sólidos municipales son valorizados en el país*. <https://www.gob.pe/institucion/minam/noticias/955458-mas-de-148-500-toneladas-de-residuos-solidos-municipales-son-valorizados-en-el-pais>

Mondragón-Sánchez, A., Medina-Orozco, L. E., Sánchez-Duque, A., & Núñez-Oregel, V. (2021). Efecto de la aplicación de biocarbón en el rendimiento de maíz en Michoacán, México. *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 39. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.896>

Murtaza, G., Ahmed, Z., Eldin, S. M., Ali, I., Usman, M., Iqbal, R., Rizwan, M., Abdel-Hameed, U. K., Haider, A. A., & Tariq, A. (2023). Biochar as a Green Sorbent for Remediation of Polluted Soils and Associated Toxicity Risks: A Critical Review. *Separations*, 10(3), 197. <https://doi.org/10.3390/separations10030197>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2022). Día Mundial del Suelo de 2022: la FAO publica el primer informe mundial sobre suelos negros. *FAO*. <https://www.fao.org/newsroom/detail/world-soil-day-2022-fao-global-report-black-soils/es>

Pérez-Cabrera, C. A., Juárez-López, P., Anzaldo-Hernández, J., Alia-Tejacal, I., Valdez-Aguilar, L. A., Alejo-Santiago, G., Castro-Brindis, R., López-Martínez, V., & Alvarado-Camarillo, D. (2022). Biocarbón de ápices de caña de azúcar como enmienda de suelo para el cultivo de

Ocimum basilicum var. *thyrsiflora* en invernadero. *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 40. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1077>

Rex, P., Mohammed Ismail, K., Meenakshisundaram, N., Barmavatu, P., & Sai Bharadwaj, A. (2023). Agricultural Biomass Waste to Biochar: A Review on Biochar Applications Using Machine Learning Approach and Circular Economy. *ChemEngineering*, 7(3), 50. <https://doi.org/10.3390/chemengineering7030050>

Sharma, A., & Chhabra, V. (2024). A Review on the Applications of Biochar in Agricultural Farms: A Low Carbon Emission Technology. *Journal of Advances in Biology & Biotechnology*, 27(7), 480–492. <https://doi.org/10.9734/jabb/2024/v27i71009>

UNESCO. (2024). *Alerta mundial de la UNESCO sobre la rápida degradación de los suelos*. UNESCO. <https://www.unesco.org/es/articles/alerta-mundial-de-la-unesco-sobre-la-rapida-degradacion-de-los-suelos>

Valdivia-Espinoza, A., & Guardia-Muguruza, X. (2023). Valorización energética de residuos orgánicos: el vínculo entre la política energética y la gestión integral de residuos sólidos. *South Sustainability*, 4(1), e074. <https://doi.org/10.21142/SS-0401-2023-e074>