

Nutrient-Enriched Biochar as a Soil Amendment for Tropical Soils: A Review of Its Impacts and Potential in Sustainable Agriculture

Djetly Julis¹; Daniel Salomon Diaz Hoil²; Ana Jacqueline Sobalvarro Nieto³
^{1,3, 2} Zamorano University, Honduras, Djetly.julis@est.zamorano.edu, asobalvarro@zamorano.edu
Daniel.diaz@est.zamorano.edu

Abstract— Biochar is a carbon-rich material produced through the pyrolysis of organic matter such as wood, agricultural residues, or livestock waste. When applied to tropical soils, it acquires characteristics of great agronomic value, including increased cation exchange capacity, improved microbiota activity, enhanced nutrient availability, and greater water retention. Nutrient-enriched biochar, produced by combining biochar with organic or mineral inputs such as compost, biofertilizers, or nitrogen-phosphorus-potassium (NPK) solutions, further amplifies these benefits. This review synthesizes evidence from studies conducted in tropical regions, showing that enriched biochar can reduce nutrient leaching by up to 40%, improve nitrogen use efficiency in crops such as maize, and increase yields in horticultural systems. The effectiveness of enriched biochar depends on feedstock origin, pyrolysis conditions, enrichment method, and soil type. Results highlight its potential as a sustainable soil amendment for degraded tropical agricultural systems.

Keywords— Biochar, yield, nutrients, tropical soils, soil amendment

Biochar Enriquecido con Nutrientes como Enmienda para Suelos Tropicales: Una Revisión de sus Impactos y Potencial en la Agricultura Sostenible

Djetly Julis^{1ib}; Daniel Salomon Diaz Hoil^{2ib}; Ana Jacqueline Sobalvarro Nieto^{3ib}
^{1,3, 2} Universidad Zamorano, Honduras, Djetly.julis@est.zamorano.edu, asobalvarro@zamorano.edu
Daniel.diaz@est.zamorano.edu

Resumen– El biochar se trata de materiales ricos en carbono, tales como madera o residuos agrícolas o ganaderos, los cuales al sufrir pirólisis adquieren características de mucho interés para la agricultura, entre ellas el aumento de la capacidad de intercambio catiónico, la mejora de la actividad microbiana, la mayor disponibilidad de nutrientes y la retención del agua en el suelo. El biochar enriquecido con nutrientes, obtenido mediante la combinación del biocarbón con insumos orgánicos o minerales como compost, biofertilizantes o soluciones NPK, potencia aún más estos beneficios. Esta revisión sintetiza evidencia de estudios realizados en regiones tropicales, mostrando que el biochar enriquecido puede reducir la lixiviación de nutrientes hasta en un 40%, mejorar la eficiencia del uso del nitrógeno en cultivos como el maíz e incrementar los rendimientos en sistemas hortícolas. La efectividad del biochar enriquecido depende de la materia prima, las condiciones de pirólisis, el método de enriquecimiento y el tipo de suelo. Los resultados destacan su potencial como enmienda sostenible para sistemas agrícolas tropicales degradados.

Palabras clave– Biochar, rendimiento, nutrientes, suelos tropicales, enmienda.

I. INTRODUCCIÓN

El biochar enriquecido con nutrientes se ha propuesto como una solución sostenible para mejorar la fertilidad de los suelos tropicales, especialmente en zonas degradadas. Sin embargo, los estudios muestran resultados diversos según el tipo de biochar, el método de enriquecimiento y las condiciones del suelo. Esto plantea la pregunta: ¿Qué efectos tiene el biochar enriquecido sobre la calidad del suelo y el rendimiento de cultivos en ambientes tropicales?

El biochar, un producto poroso, oscuro y granulado que resulta de la pirólisis de diversos materiales orgánicos ricos en carbono, posee propiedades muy valoradas en el sector agrícola [1], especialmente como enmienda de suelos. Las enmiendas buscan restaurar o estabilizar características edáficas esenciales para la producción, como la estructura, la textura, la capacidad de retención de agua [2] y la mejora en la absorción, estabilidad y disponibilidad de nutrientes.

Se debe considerar que los suelos tropicales son un caso particular en las ciencias agrícolas debido a sus condiciones climáticas y edafológicas únicas. Por ello, evaluar el efecto e impacto del biochar en estos suelos, tanto en términos de rendimiento productivo, como de calidad de los cultivos, es fundamental. En tal sentido se podrá determinar posibles mejoras o adaptaciones a las prácticas agrícolas actuales,

además de proponer alternativas innovadoras como el uso de biochar.

Este material ya enriquecido va más allá de las propiedades del biochar virgen al incorporar nutrientes. Este proceso potencia su capacidad para aumentar la capacidad de intercambio catiónico (CIC), crucial para retener nutrientes y reducir su lixiviación. Además, mejora la estructura del suelo, la aireación y la retención de agua, aspectos vitales en climas tropicales. El biochar enriquecido también puede contribuir a la modificación del pH del suelo y a la estimulación de la actividad microbiana, creando un ambiente más propicio para el crecimiento de los cultivos y el ciclo de nutrientes. En ambientes tropicales, representa una oportunidad prometedora para la rehabilitación de suelos degradados, el aumento de la productividad agrícola sostenible y la mejora de la seguridad alimentaria.

Se pretende abordar el tema del biocarbón o biochar, aplicado al contexto tropical o en áreas próximas al Ecuador geológico, haciendo énfasis en su enriquecimiento con minerales aprovechables por organismos vegetales, analizando qué tanto beneficia a las propiedades del suelo y a los rendimientos productivos.

Para la elaboración de esta revisión, se realizó una búsqueda bibliográfica sistemática en las bases de datos Scopus, Web of Science, SciELO y Google Scholar, utilizando los términos de búsqueda: “biochar enriquecido”, “nutrient-enriched biochar”, “biochar tropical soils” y “biochar soil amendment tropics”. Se incluyeron estudios publicados entre 2009 y 2024, con criterios de inclusión que consideraron: (1) estudios realizados en regiones tropicales o subtropicales, o que emplearon suelos tropicales como sustrato experimental; (2) trabajos que evaluaron el efecto del biochar enriquecido o virgen sobre propiedades del suelo y/o rendimiento de cultivos; y (3) publicaciones en revistas arbitradas o como tesis de grado de instituciones reconocidas. Se excluyeron estudios realizados exclusivamente en climas templados sin referencia a condiciones tropicales, así como trabajos de opinión sin respaldo experimental. La selección final comprendió 15 referencias que abarcan experimentos de campo, estudios de laboratorio y revisiones previas, las cuales se analizaron comparativamente con el propósito de identificar tendencias, discrepancias y vacíos en el conocimiento existente.

II. BIOCHAR EN LA AGRICULTURA

A. Impacto en la nutrición vegetal

Se ha demostrado que el biochar por sí solo tiene la capacidad de aportar al suelo características que lo mejoran para la producción vegetal, además, mejoran las condiciones químicas del suelo, tales como mejora del pH, retención de nutrientes y aumento del intercambio catiónico, entre otros.

Es de suma importancia conocer e identificar la diferencia entre aportar nutrientes y mejorar la disponibilidad de los mismos, en el primer caso, el biochar por sí solo puede incluir macro o micronutrientes, dependiendo del tipo de materia prima, tal como lo indica [3]. El biochar posee diferentes contenidos de N, P, K en dependencia del tipo de biomasa; se encuentra mayor contenido total de N y P en los obtenidos a partir de materia prima de origen animal que en los de origen vegetal; asimismo, se pueden encontrar diferentes proporciones de micronutrientes. Todo lo anterior debe considerarse de un biocarbón sin enriquecer, solamente como materia prima luego de sufrir pirólisis.

Se ha descubierto que la existencia de ciertos elementos en el biochar no está siempre disponible para las plantas [4], pueden estar en formas más estables o sin oxidar/reducir, lo cual puede parecer negativo, sin embargo, es beneficioso para el suelo, especialmente para el cultivo de especies perennes, puesto que la liberación o disponibilidad de los nutrientes es lenta, haciendo que la pérdida de nutrientes por lixiviación sea menor. Aplicado al caso de biochar enriquecido, por ejemplo, puede aplicársele al suelo biocarbón mejorado con nitrato (NO_3^-), el cual se convierte lentamente a amonio (NH_4^+), pasando de una forma inaccesible para la planta a ser la forma mejor aprovechada por la planta.

Por otro lado, es importante recordar la mejora de la disponibilidad de nutrientes, es decir, la forma y el tiempo en que los diversos minerales pueden ingresar a la planta para ser aprovechados. Uno de los principales efectos a tratar con respecto al tema es el considerable aumento de la capacidad de intercambio catiónico (CIC), en tal sentido, una baja CIC hace referencia a la baja habilidad de ese suelo de retener nutrientes, es característico de los suelos arenosos o pobres en materia orgánica [5], con lo cual, se puede subrayar que, además de aportar nutrientes al suelo, se pueden retener los mismos, haciendo que los aniones característicos del biochar fijen o adhieran cationes como: Amonio (NH_4^+), Calcio (Ca^{2+}), Magnesio (Mg^{2+}) y Potasio (K^+) [3].

Según Ref. [6] identificaron la formación de un recubrimiento orgánico complejo y abundante en nutrientes en el biochar combinado con compost, que cubre las superficies externas e internas de las partículas del biochar. Este recubrimiento agrega absorción de agua, restos redox activos y porosidad adicional, lo que fortalece la interacción biochar-agua y así incrementa la retención de nutrientes, lo que explicaría la eficiencia del biochar combinado con compost, lo cual supone un enriquecimiento burdo, apuntando a la funcionalidad de un biochar enriquecido con materiales nutritivos de origen mineral.

La creciente evidencia sobre los beneficios del biochar subraya su potencial no solo como una enmienda del suelo, sino como un componente clave en la transición hacia sistemas agrícolas más sostenibles. En Honduras, donde los desafíos como la degradación del suelo, la baja retención de nutrientes en suelos arenosos y la variabilidad climática son problemáticas que impactan los sistemas productivos de forma directa, la aplicación de biochar parece ser una alternativa a las prácticas tradicionales usadas actualmente. Más allá de sus propiedades para mejorar la fertilidad y la disponibilidad de nutrientes, el biochar contribuye al secuestro de carbono, ayudando a mitigar el cambio climático al almacenar carbono de forma estable en el suelo por siglos.

La integración del biochar en las prácticas agrícolas locales podría transformar paisajes degradados en tierras productivas, reducir la dependencia de fertilizantes sintéticos y minimizar la lixiviación de nutrientes, protegiendo así los cuerpos de agua [5]. Sin embargo, para maximizar su adopción y eficacia, es fundamental continuar la investigación adaptada a las condiciones edafoclimáticas específicas de Honduras. Esto incluye evaluar diferentes tipos de biomasa disponibles localmente (residuos agrícolas, forestales), optimizar las condiciones de producción del biochar, y desarrollar protocolos de aplicación que se ajusten a los sistemas de cultivo predominantes en la región.

B. Promoción del crecimiento vegetal

El biochar actúa como mejorador químico y físico del suelo, promoviendo el crecimiento vegetal de manera directa e indirecta. Su estructura porosa facilita el desarrollo del sistema radicular, especialmente de las raíces absorbentes, al mejorar la aireación y la retención de agua en el suelo. Ref. [7] demostraron que la adición de biochar de pirólisis lenta a un vertisol sembrado con trigo duro (*Triticum durum* L.) produjo un aumento en la proliferación de raíces finas, incrementando la longitud específica y reduciendo la densidad del tejido radicular, lo que promovió el desarrollo del cultivo. Este efecto es especialmente relevante en suelos tropicales compactados o con texturas adversas, donde el biochar puede restaurar la porosidad y mejorar el intercambio gaseoso en la rizosfera.

Cuando el biochar está enriquecido con nutrientes, su efecto sobre el crecimiento vegetal se amplifica considerablemente. Ref. [14] reportan que el biochar enriquecido con compost incrementa la actividad microbiana benéfica del suelo, incluyendo una mayor colonización por hongos micorrízicos y bacterias fijadoras de nitrógeno, lo que resulta en una absorción más eficiente de nutrientes por parte de las plantas. Este efecto es particularmente pronunciado en suelos tropicales, donde las altas temperaturas y la humedad aceleran la degradación de la materia orgánica, haciendo que la actividad biológica dependa en mayor medida de enmiendas estables como el biochar. Asimismo, la liberación lenta y sostenida de nutrientes desde el biochar enriquecido contrarresta las pérdidas por lixiviación, garantizando una disponibilidad más prolongada para el cultivo en comparación con fertilizantes convencionales de liberación rápida [3].

Sin embargo, es importante reconocer que no todos los tipos de biochar producen el mismo efecto sobre el crecimiento

vegetal. La temperatura de pirólisis, la materia prima y el método de enriquecimiento determinan las propiedades finales del material. Estudios comparativos entre biochar virgen y enriquecido demuestran consistentemente que el biochar no enriquecido tiene efectos más limitados sobre cultivos de ciclo corto, mientras que el enriquecido produce mejoras agronómicas más notables y predecibles [12]. Esta diferencia subraya la importancia de seleccionar el tipo de biochar adecuado según el sistema productivo, el tipo de suelo y las necesidades nutricionales específicas del cultivo.

Estos hallazgos en conjunto posicionan al biochar enriquecido como una herramienta dual: un mejorador físico-químico del suelo y un estimulador biológico del crecimiento vegetal, con efectos sinérgicos que lo diferencian claramente del biochar virgen y de los fertilizantes convencionales.

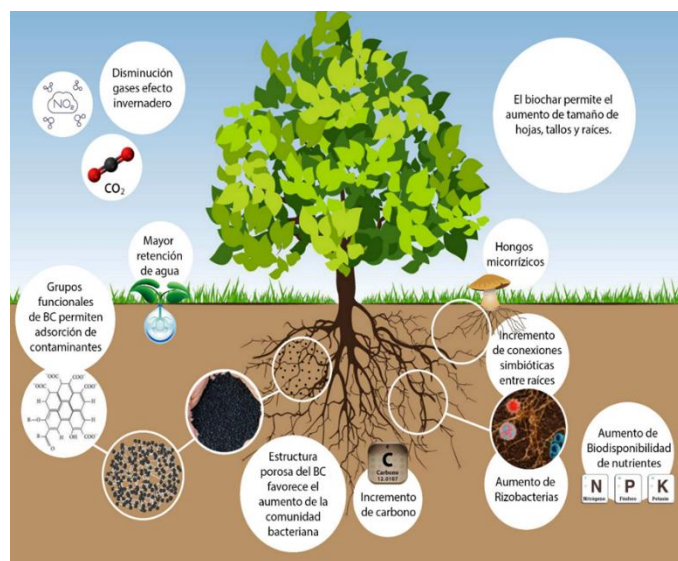


Fig. 1. Representación de los beneficios al suelo efectuados por BC (Biocarbón)

III. BIOCHAR ENRIQUECIDO EN SUELOS TROPICALES

El enriquecimiento del biochar se trata de una estrategia importante para potenciar su eficacia como enmienda en suelos tropicales degradados. Esta práctica busca superar las limitaciones del biochar no tratado, como su elevada relación de Carbono y Nitrógeno y su limitada disponibilidad de nutrientes de rápida asimilación. Los métodos más comunes para enriquecer biochar incluyen la activación en soluciones líquidas ricas en nutrientes, como bioles, y la co-compostación con residuos agrícolas.

En un estudio realizado en suelos sobrepastoreados de la Amazonía peruana, se evaluó el efecto del biocarbón producido a partir de cáscaras de palma aceitera, enriquecido con biol de estiércol vacuno mediante fermentación anaeróbica. El proceso de activación o enriquecimiento incrementó significativamente las concentraciones de nitrógeno, fósforo y potasio, además de mejorar parámetros como la materia orgánica y la conductividad eléctrica del material tratado. La disminución del pH del biochar enriquecido se atribuyó a la acidez propia del

biol, lo cual puede contribuir a una mayor disponibilidad de micronutrientes en suelos ácidos [8].

Complementariamente, en un estudio conducido en la India, se prepararon co-composts nitrogenados a partir de biochar de residuos de arroz, maíz y gramínea, mezclados en proporciones variables con sus respectivos residuos orgánicos. Las enmiendas con mayor proporción de biochar (1:7) mostraron los mayores incrementos en el pH y la capacidad de intercambio catiónico (CIC), alcanzando niveles comparables a los tratamientos con carbonato de calcio. Asimismo, se observaron incrementos significativos en las actividades enzimáticas del suelo, como la deshidrogenasa y β -glucosidasa, lo cual evidencia una mejora en la calidad biológica del suelo tratado [9].

En ambos casos se ha evidenciado la capacidad del biochar enriquecido como enmienda en sistemas agrícolas tropicales, particularmente en suelos ácidos, degradados o con baja fertilidad. Además, su aplicación promueve el aprovechamiento de residuos agroindustriales y ganaderos, alineándose con los principios de sostenibilidad y economía circular.

IV. PRODUCCIÓN DE BIOCHAR ENRIQUECIDO

El biocarbón enriquecido con nutrientes representa una estrategia viable para mejorar la fertilidad de suelos tropicales altamente intemperizados, los cuales tienden a ser ácidos y de baja disponibilidad de nutrientes esenciales como el fósforo (P). En este contexto, diversos estudios han explorado fuentes orgánicas y minerales, así como, técnicas de producción, con el fin de generar materiales que actúen como enmiendas multifuncionales para la agricultura sostenible.

Se llevó a cabo una investigación orientada a la síntesis de biochar rico en fósforo utilizando una combinación de biomasa vegetal (cascarilla de arroz y de café) con suelos amazónicos de textura arenosa y arcillosa, en combinación con superfosfato triple como fuente de fósforo [10]. El estudio se centró en evaluar el efecto del momento de adición del fertilizante fosfatado, antes o después del proceso de pirólisis, sobre la disponibilidad de fósforo y la formación de minerales asociados. Se obtuvieron ocho tipos de biochar enriquecido, empleando pirólisis controlada en mufla a 350 °C durante dos horas. Cuatro de los biochars fueron enriquecidos con superfosfato antes de la pirólisis, mientras que los otros cuatro fueron enriquecidos después del tratamiento térmico.

Los resultados indicaron que añadir superfosfato después de la pirólisis produjo materiales con mayor contenido de fósforo disponible, en comparación con los biochars donde el fertilizante fue sometido al calor. El análisis mineralógico mediante rayos X reveló la formación de minerales cristalinos, fluorapatita e hidroxiapatita cuando el superfosfato fue incluido antes de la pirólisis, lo cual se tradujo en una reducción de la biodisponibilidad del P. En comparación, la adición posterior preservó formas más solubles. Este hallazgo resalta la importancia del momento de incorporación del nutriente para optimizar el impacto agronómico del biochar enriquecido. Asimismo, el estudio mostró que el tipo de biomasa y la textura del suelo afectan propiedades como el pH, el contenido de carbono total y la capacidad de adsorción de fósforo [10].

Por otro lado, [1], realizaron un estudio centrado en la valorización de residuos orgánicos avícolas, específicamente gallinaza y pollinaza, a través de su conversión en biochar, evaluando su capacidad como enmienda orgánica rica en nutrientes [11]. La producción se efectuó en un horno pirólítico de diseño artesanal, utilizando una configuración de doble cámara y materiales combustibles de origen vegetal (leña, ramas, hojas), bajo condiciones de pirólisis lenta con duración promedio de tres horas. A diferencia del enfoque mineralógico de [10], este estudio tuvo un fuerte componente de evaluación agronómica práctica a través de ensayos con rábano (*Raphanus sativus*), evaluando el índice de germinación.

Los resultados mostraron diferencias significativas entre los biochars derivados de gallinaza y pollinaza. El biochar de gallinaza presentó mayor rendimiento de producción y densidad aparente, así como mayor contenido de cenizas, fósforo total, calcio, magnesio y hierro, en comparación con la pollinaza. En términos de aplicación agrícola, el tratamiento con biochar de gallinaza al 3 % generó el mejor índice de germinación, por consiguiente, indica una baja o nula fitotoxicidad y un alto potencial como enmienda para suelos. Esto apunta a que los residuos avícolas, cuando son adecuadamente transformados por pirólisis, pueden convertirse en una fuente viable y sostenible de nutrientes para suelos agrícolas degradados [1].

TABLA I
 ANÁLISIS QUÍMICO ELEMENTAL DEL BIOCHAR
 RESULTANTE EN RELACIÓN A LA MATERIA PRIMA ORIGINAL. [1]

BIOCHAR	Rep	C (g/100 g)	C/N	Ceniza (g/100 g)	Humedad (%)	pH
Gallinaza (GG)	R0	17,61	9,27	62,8	10,63	8,62
	R1	8,47	7,92	80,36	0,95	10,23
	R2	7,85	7,27	81,84	0,59	10,21
	R3	8,47	8,47	83,86	0,57	10,02
Pollinaza (PO)	R0	24,53	9,89	25,19	18,84	8,74
	R1	9,53	4,84	55,2	1,57	10,68
	R2	10,83	4,77	52,29	1,89	10,98
	R3	8,07	4,23	56,47	1,93	11,01
(GG-PO)	R0	16	6,75	37,38	15,44	8,51
	R1	2,71	1,9	71,53	1,27	10,18
	R2	6,67	5,17	71,65	1,59	9,73
	R3	6,44	4,92	69,28	1,33	10,12

La Molina Calidad Total Laboratorios

La pirólisis resultó en una reducción de la cantidad de carbono, mientras que el pH aumentó significativamente, lo que sugiere su utilidad como enmienda para suelos agrícolas acidificados, comunes en las selvas tropicales. Se observa una notable discrepancia entre los orígenes del biochar virgen, incluso cuando provienen de fuentes casi idénticas, diferenciándose solo por el destino del ave (aves de postura frente a aves de producción cárnica). Además, las características visibles de ambos biochars son notorias:



a) Muestra para gallinaza, b) Muestra para pollinaza [1]

Fig 2. Muestras representativas de biomasa residual y respectivo biochar resultante.

Ambos estudios coinciden en destacar que las propiedades del biochar enriquecido dependen fuertemente tanto de la materia prima como de las condiciones de pirólisis (temperatura, tiempo, atmósfera) y del momento en que se incorporan los nutrientes. Mientras que Matoso et al. proponen un enfoque más tecnificado con control mineralógico para modular la disponibilidad del fósforo, [1], demuestran la viabilidad de soluciones de bajo costo a partir de residuos de producciones animales, validando su uso mediante ensayos de crecimiento vegetal.

El estudio de [8], apunta a que su fuente de biochar, enriquecido con biol de excremento de bovinos, aumenta los niveles de Fósforo y Potasio significativamente, lo cual no ocurrió con el CIC o pH, por ejemplo. Sin embargo, el estudio de [1], apunta a un valor significativo de aporte de micronutrientes. En tal sentido es importante destacar la gran variación de beneficios del biocarbón dependiendo de la fuente de estos, así como si están o no enriquecidos. Además, existirá variación dependiendo de la fuente o método por el cual se enriquece.

Las investigaciones mencionadas aportan evidencia sólida sobre las posibilidades de adaptar la producción de biochar enriquecido a distintos contextos: desde aplicaciones de precisión para mejorar la eficiencia de fertilización fosfatada en suelos tropicales ácidos, hasta alternativas de bajo costo y alta disponibilidad para zonas rurales o de bajos recursos. Esta versatilidad convierte al biochar enriquecido en una herramienta clave dentro de las estrategias de agricultura regenerativa y economía circular en América Latina

V. IMPACTO DEL BIOCHAR ENRIQUECIDO EN SUELOS TROPICALES

Los suelos tropicales presentan múltiples desafíos que limitan su productividad agrícola: alta acidez, baja retención de nutrientes, escaso contenido de materia orgánica y baja actividad biológica. Frente a esta problemática, el biochar enriquecido, es decir, el biochar combinado con compost, fertilizantes o microorganismos ha demostrado ser una solución eficaz y sostenible para mejorar la calidad del suelo y aumentar el rendimiento de los cultivos en estas regiones.

Según Ref. [15] proporcionan evidencia sólida sobre cómo el biochar actúa como reservorio de nutrientes en suelos tropicales. En un Ferralsol amazónico, la aplicación de biochar redujo las pérdidas de calcio, magnesio y potasio por lixiviación en hasta un 40% durante el primer año, con efectos acumulativos positivos sobre la fertilidad del suelo en los años siguientes. Este estudio destaca que la eficacia del biochar depende del tipo de suelo y de su contenido inicial de materia orgánica, siendo más pronunciada en suelos ácidos y degradados. Asimismo, señala que en suelos con alta saturación de aluminio, común en los trópicos, la disponibilidad de fósforo puede verse comprometida a menos que el biochar sea combinado con fuentes solubles de P, como el superfosfato, tal como demostraron [10].

Según Ref. [14] presentan una revisión sobre el efecto del biochar en la actividad microbiana del suelo, documentando incrementos en la biomasa microbiana, la actividad enzimática (deshidrogenasa, fosfatasa) y la colonización por hongos micorrízicos. Estos efectos son especialmente relevantes en suelos tropicales, donde las altas temperaturas y la humedad aceleran la degradación de la materia orgánica, haciendo que la estabilidad del biochar como sustrato microbiano sea un factor diferencial frente a otras enmiendas. Los autores destacan que el biochar enriquecido con compost potencia estos efectos al combinar una fuente estable de carbono con nutrientes de mayor disponibilidad, complementando los hallazgos de [6] sobre los recubrimientos orgánicos en la superficie del biochar.

Según Ref. [13] evaluaron el efecto del biochar sobre la NUE del maíz en suelos de alta fertilidad en Illinois, EE.UU., encontrando que el biochar virgen no mejoró el rendimiento ni la eficiencia de recuperación de nitrógeno en clima templado. Sin embargo, los propios autores reconocen que los beneficios del biochar son más consistentes en suelos tropicales degradados de textura gruesa y pH bajo, donde meta-análisis reportan incrementos de rendimiento del 10–42%. Este contraste refuerza el argumento central de la presente revisión: en suelos naturalmente fértiles el biochar aporta poco agrónomicamente, mientras que en suelos tropicales degradados —como los de Honduras— su potencial es significativamente mayor, especialmente cuando se combina con fuentes de nutrientes como compost o bioles [13].

Según Ref. [12] evaluaron el efecto del biocarbón en propiedades químicas del suelo y en el rendimiento de lechuga en condiciones de campo en Zamorano, Honduras. El estudio demostró que el biochar virgen, sin enriquecimiento, no generó mejoras significativas en el rendimiento del cultivo, mientras que el biochar aplicado a dosis de 13.5 t/ha produjo un incremento del 48% en el rendimiento. Este contraste entre dosis y tipo de biochar resalta la importancia de la activación previa con nutrientes para cultivos de ciclo corto en suelos

tropicales, donde la demanda nutricional inmediata supera la capacidad de liberación del biochar virgen.

Según Ref. [11] presentan una revisión exhaustiva sobre el rol del biochar y del biochar combinado con compost en la mejora de la calidad del suelo y el rendimiento de cultivos. Los autores demuestran que la combinación biochar-compost mejora de manera consistente el pH, la materia orgánica, la CIC y la disponibilidad de nutrientes, con efectos superiores a los del biochar virgen. Adicionalmente, documentan reducciones en la biodisponibilidad de metales pesados como el cadmio en suelos tratados, lo que sugiere un potencial adicional para la remediación de suelos contaminados. Sin embargo, advierten que la efectividad varía según el tipo de suelo, el cultivo y las condiciones climáticas, subrayando la necesidad de adaptar las dosis y métodos de aplicación a cada contexto productivo.

Sin embargo, los autores advierten que la efectividad varía según el tipo de suelo, el cultivo y las condiciones climáticas, subrayando la necesidad de adaptar las dosis y métodos de aplicación a cada contexto productivo.

Según Ref. [3] señalan que el biochar mejora simultáneamente las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, generando una mayor proliferación radicular, mejor absorción de agua y nutrientes, y mayor tolerancia al estrés hídrico y nutricional. Estos beneficios son especialmente valiosos en contextos tropicales donde los suelos presentan limitaciones múltiples de forma simultánea, y donde el biochar actúa como un mejorador integral que potencia tanto la nutrición vegetal directa como las condiciones edáficas que favorecen la productividad sostenida. El biochar actúa como un mejorador integral que potencia tanto la nutrición vegetal directa como las condiciones edáficas que favorecen la productividad a mediano y largo plazo.

Los estudios analizados revelan que el biochar enriquecido muestra mayor efectividad en suelos tropicales ácidos y degradados, donde mejora significativamente la fertilidad y estructura del suelo, mientras que sus beneficios son menos pronunciados en suelos ya fértiles. La optimización de su aplicación depende críticamente de un diseño adaptado al tipo de cultivo, condiciones climáticas y objetivos específicos (nutrición vegetal vs. remediación de suelos). Sin embargo, persisten brechas importantes, como la necesidad de estudios a largo plazo (>5 años) que evalúen su sostenibilidad y análisis económicos detallados que justifiquen su escalamiento. Estos hallazgos posicionan al biochar enriquecido como una herramienta versátil para la agricultura tropical sostenible, aunque su implementación exitosa requiere estrategias personalizadas que consideren las particularidades locales y los sistemas de producción específicos, garantizando así su adopción y eficacia a mediano y largo plazo.

TABLA II
 COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA EN FUNCIÓN DEL DOSAJE Y
 EL ORIGEN DEL BIOCHAR EN DISTINTOS TIPOS DE CULTIVOS.

<u>Cultivo</u>	<u>Tipo de Biochar</u>	<u>Dosis</u>	<u>Resultados clave</u>	<u>fuentes</u>
Lechuga	Biochar de olote de maíz	13.5 t/ha	+48% rendimiento	[12]
Maíz	Biochar + urea	5-10 t/ha	Sin efecto significativo en NUE en clima templado; mayor potencial en trópicos	[13]
Tomate	Biochar + compost	15 t/ha	Reducción 50% Cd	[11]

VI. CONCLUSIÓN

La evidencia analizada confirma que el biochar enriquecido con nutrientes representa una enmienda eficaz para suelos tropicales degradados, con efectos positivos documentados sobre la capacidad de intercambio catiónico, la retención de nutrientes, la actividad microbiana y el rendimiento de cultivos. A diferencia del biochar virgen, el enriquecido —ya sea con compost, bioles o fuentes minerales como superfosfato— produce mejoras agronómicas más rápidas y predecibles, especialmente en cultivos de ciclo corto como la lechuga [12], en cultivos de grano como el maíz en condiciones tropicales, y en suelos con alta acidez y baja fertilidad donde el biochar virgen ya muestra respuesta positiva [15].

Los estudios revisados permiten responder la pregunta de investigación planteada: el biochar enriquecido mejora la calidad del suelo y el rendimiento de cultivos en ambientes tropicales, pero su efectividad depende críticamente de la materia prima, el método de enriquecimiento, la dosis aplicada y las condiciones edáficas locales [10, 11]. En suelos con alta acidez y baja fertilidad, como los Ferralsoles amazónicos o los suelos arenosos centroamericanos, los beneficios son más pronunciados [15, 8].

Desde una perspectiva de sostenibilidad, el uso de residuos locales como gallinaza, pollinaza o cáscaras de palma aceitera como materia prima del biochar alinea esta práctica con los principios de economía circular [1, 8]. Sin embargo, persisten brechas importantes: la mayoría de los estudios disponibles son de corto plazo, faltan análisis económicos que justifiquen la adopción a escala por pequeños productores, y la variabilidad en los protocolos de producción dificulta la comparación de resultados entre contextos.

Para Honduras, donde los suelos arenosos y degradados de la región central presentan baja CIC y escasa retención de nutrientes [5], el biochar enriquecido con residuos locales de ganadería o avicultura representa una alternativa viable y de bajo costo frente a los fertilizantes convencionales. Se recomienda priorizar investigaciones de campo adaptadas a las condiciones edafoclimáticas de las principales zonas productoras del país, evaluando tipos de biomasa localmente disponibles y optimizando las condiciones de pirólisis para maximizar la calidad agronómica del producto final.

En conclusión, el biochar enriquecido posee el potencial de transformar suelos tropicales degradados en sistemas más productivos y resilientes, contribuyendo simultáneamente a la seguridad alimentaria y al secuestro de carbono. Su implementación exitosa requiere estrategias adaptadas al contexto local, continuidad en la investigación y mecanismos de transferencia tecnológica hacia los agricultores de la región.

REFERENCIAS

- [1] E. Trujillo, C. Valencia, M. Alegría, A. Sotelo, M. Césare, "Producción y caracterización química de biochar a partir de residuos orgánicos avícolas," *Revista de la Sociedad Química del Perú*, vol. 86, no. 1
- [2] P. Arechua C., "Biochar como enmienda orgánica del suelo en los cultivos hortícolas," Tesis de Ingeniero Agropecuario, Universidad Técnica de Babahoyo, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Babahoyo, Ecuador, 2024.
- [3] I. González-Marquetti, M. Rodríguez, B. Delgado-Oramas, and H. Schmidt, "Biochar y su contribución a la nutrición, crecimiento y defensa de las plantas," *Revista de Protección Vegetal*, vol. 35, no. 2, 2020.
- [4] K. Chan and Z. Xu, "Biochar nutrient properties and their enhancement," in *Biochar for Environmental Management-Science and Technology*, J. Lehmann and S. Joseph, Eds. London, UK: Earthscan, pp. 68-84, 2009.
- [5] A. Chávez A., "Comparación de dos métodos de determinación de la capacidad de intercambio catiónico en suelos de la región central de Honduras," Proyecto Especial de Graduación (Tesis), Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras, 2015.
- [6] N. Hagemann, S. Joseph, H. Schmidt, C. Kammann, J. Harter, and T. Borch, "Organic coating on biochar explains its nutrient retention and stimulation of soil fertility," *Nature Communications*, vol. 8, no. 1, p. 1089, 2017.
- [7] M. Olmo, J. Albuquerque, V. Barrón, M. del Campillo, A. Gallardo, and M. Fuentes, "Wheat growth and yield responses to biochar addition under Mediterranean climate conditions," *Biology and Fertility of Soils*, vol. 50, pp. 1023-1033, 2014.
- [8] R. L. Reátegui, M. Mendoza, J. A. Orihuela, W. N. Iturri, and E. Velazco-Castro, "Uso de biocarbón de cáscaras de semilla de palma aceitera enriquecido en biol de estiércol de vaca para mejorar suelos sobrepastoreados," *Revista Tayacaja*, vol. 4, no. 1, pp. 29-38, 2023.
- [9] P. Nain, "Nitrogen-enriched biochar co-compost for the amelioration of degraded tropical soil," *Environmental Technology*, vol. 45, no. 2, pp. 250-261, 2024.

- [10]S. Matoso, P. Wadt, V. Souza Júnior, and X. Pérez, "Synthesis of enriched biochar as a vehicle for phosphorus in tropical soils," *Acta Amazonica*, vol. 49, no. 2, pp. 119–128, 2019.
- [11]G. Agegnehu, A. K. Srivastava, and M. I. Bird, "The role of biochar and biochar-compost in improving soil quality and crop performance: A review," *Applied Soil Ecology*, vol. 119, pp. 156–170, 2017.
- [12]J. A. Santamaria Pita and C. E. Rossignoli Chavez, "Efecto de la aplicación de biocarbón sobre propiedades químicas de suelo y desarrollo y rendimiento de lechuga," Proyecto Especial de Graduación, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras, 2021.
- [13]G. Preza Fontes, K. D. Greer, and C. M. Pittelkow, "Does biochar improve nitrogen use efficiency in maize?," *GCB Bioenergy*, vol. 16, p. e13122, 2024.
- [14]H.-A. Melo-Lozano and N. Afanasjeva, "Efecto de la aplicación de biochar en la actividad microbiana en suelos: Revisión," *Revista Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, vol. 21, no. 2, pp. 193-209, 2023.
- [15]J. Major, J. Lehmann, M. Rondon, and C. Goodale, "Biochar effects on nutrient leaching from a Central Amazonian Ferralsol," *European Journal of Soil Science*, vol. 61, no. 5, pp. 791-801, 2010.