

## Modelo de transferencia tecnológica de biocarbón en sistemas agroforestales, Macuelizo, Nicaragua, (2022–2025)

### A Technology Transfer Model for Biochar Application in Agroforestry Systems in Macuelizo, Nicaragua (2022–2025)

*Gutiérrez Acuña, Katia karolina*<sup>1\*</sup>

*Castellón Alvarado, Xiomara Isabel*<sup>2</sup>


*Zavala Figueroa, Juana María*<sup>3</sup>

*Reyes Barreda, Trinidad German*<sup>4</sup>


<sup>1,2</sup> Bosques Nicanadá BOSNICA S, A, Somoto, Nicaragua


<sup>3</sup> Investigadora independiente, San Luis Potosí, México

<sup>4</sup> Universidad Francisco Luis Espinoza, Estelí, Nicaragua

<sup>1</sup> [Katiagutierrez1891@gmail.com](mailto:Katiagutierrez1891@gmail.com) 

<sup>2</sup> [xiiuucast@gmail.com](mailto:xiiuucast@gmail.com) 

<sup>3</sup> [jmaryzavala24@gmail.com](mailto:jmaryzavala24@gmail.com) 

<sup>4</sup> [deptoagronomia@unflep.edu.ni](mailto:deptoagronomia@unflep.edu.ni) 

Recibido/received:03/10/2025 Corregido/revised:30/01/2026 Aceptado/accepted:20/04/2026

**Resumen:** El presente estudio se desarrolló en el municipio de Macuelizo, Nueva Segovia Nicaragua, con el propósito de diseñar un modelo de transferencia tecnológica para la aplicación de biocarbón en sistemas agroforestales de café durante el período 2022–2025. Los resultados demostraron las plantas forestales tratadas con biochar presentaron el mayor porcentaje de sobrevivencia (97.7%) y un crecimiento superior, evidenciando la capacidad del biochar para mejorar la fertilidad del suelo, optimizar la retención de nutrientes y favorecer el desarrollo vegetal. En la recopilación de información se utilizaron encuestas, entrevistas y observación participante aplicadas a 21 productores que manejan sistemas agroforestales, así como al personal del Centro de Producción de Biochar de BOSNICA S.A, con el fin de caracterizar las condiciones socioeconómicas y productivas de los caficultores, quienes en su mayoría son pequeños productores con fincas de entre 3 y 3.5 hectáreas y conocer el proceso la producción del biochar. Asimismo, se describe la producción de biochar mediante pirólisis de biomasa forestal, su posterior enriquecimiento con insumos orgánicos y los análisis fisicoquímicos que respaldan su calidad como enmienda del suelo. Para evaluar su potencial agronómico, se establecieron parcelas experimentales con cuatro tratamientos: biochar, fertilizante químico, aporcado y un testigo. Finalmente, se propone un modelo de transferencia tecnológica orientado a fortalecer su adopción entre los productores aliados a la empresa

\* Autor de correspondencia  
Correo: [Katiagutierrez1891@gmail.com](mailto:Katiagutierrez1891@gmail.com)



Bosques Nicanada S.A BOSNICA S.A, promoviendo sistemas agrícolas más sostenibles, resilientes y con menor impacto ambiental en la región norte de Nicaragua.

**Palabras clave:** Biocarbón; Agricultura sostenible; adopción tecnológica; secuestro de carbono; sistemas agroforestales.

**Abstract:** The present study was conducted in the municipality of Macuelizo, Nueva Segovia, with the purpose of designing a technological transfer model for the application of biochar in coffee agroforestry systems during the 2022–2025 period. The results showed that forest plants treated with biochar achieved the highest survival rate (97.7%) and significantly greater growth, demonstrating biochar's ability to improve soil fertility, enhance nutrient retention, and promote plant development. Information was collected through surveys, interviews, and participant observation applied to 21 producers managing agroforestry systems, as well as personnel from BOSNICA S.A.'s Biochar Production Center. This process aimed to characterize the socioeconomic and productive conditions of coffee growers most of whom are small-scale producers with farms ranging from 3 to 3.5 hectares and to document the biochar production process. The study also describes the production of biochar through the pyrolysis of forest biomass, its subsequent enrichment with organic inputs, and the physicochemical analyses supporting its quality as a soil amendment. To evaluate its agronomic potential, Experimental plots were established with four treatments: biochar, chemical fertilizer, hilling, and a control. Finally, the study proposes a technological transfer model aimed at strengthening the adoption of biochar among producers associated with Bosques Nicanada S.A. (BOSNICA S.A.), promoting more sustainable and resilient agricultural systems with lower environmental impact in northern Nicaragua.

**Keywords:** Biochar; Sustainable agriculture; technological adoption; Carbon sequestration; Agroforestry systems.

## Introducción

El sector agropecuario y forestal constituye un pilar estratégico y social para Nicaragua, funcionando como un motor clave para el desarrollo económico y la seguridad alimentaria nacional. Con una contribución del 16% al Producto Interno Bruto (PIB) (Staff, 2023) y la generación de aproximadamente el 31.1% del empleo, este sector es la fuente de subsistencia de cerca de 262,546 familias (Montano, 2023). Sin embargo, a pesar de su relevancia, su sostenibilidad futura se ve comprometida por una serie de retos estructurales y ambientales, incluyendo la baja productividad generalizada (en rubros agrícolas, mano de obra, capital y tierra) y la dependencia de productos primarios con bajo valor agregado (Montano, 2023). Uno de los principales desafíos que enfrenta el desarrollo agrícola en Nicaragua es la degradación del suelo, fenómeno que afecta de forma directa la productividad y resiliencia de los sistemas agroforestales. Este problema se manifiesta con particular severidad en el municipio de Macuelizo, Nueva Segovia, donde la erosión, la salinización y la acidificación han reducido la fertilidad y la capacidad hídrica del suelo, afectando cultivos de alto valor como el café. La pérdida de la capacidad productiva del suelo no solo compromete los ingresos de las familias rurales, sino que también amenaza la seguridad alimentaria y los medios de vida locales.

Debido a que, la erosión del suelo es un peligro para la seguridad alimentaria, urge tomar medidas, ya que se sostiene que; en suelos muy erosionados el rendimiento agrícola puede disminuir entre 65 % y 80 % (Han et al., 2020; Abd-Elmabod et al., 2020; Asfaw et al., 2020) citado en (Pariona et al., 2020). Ante ello, el biochar disminuye el riesgo de degradación de los suelos, que están relacionados indirectamente para garantizar la seguridad alimentaria. Por esta razón, las acciones que garantizan la seguridad alimentaria deberían abarcar políticas en torno al desarrollo de la producción agrícola sostenible y resiliente (Sartori et al., 2019; Deng, et al., 2018; Gomes et al., 2019) citado en (Pariona et al., 2020).

En este contexto, el biochar (biocarbón o carbón vegetal) se presenta como una alternativa prometedora, este material carbonoso se obtiene mediante la pirólisis de biomasa bajo condiciones limitadas de oxígeno y su uso se remonta a prácticas ancestrales de comunidades amazónicas, que mejoraban la fertilidad del suelo mediante la incorporación de residuos orgánicos carbonizados (Forero et al., 2022). Actualmente, el biocarbón ha despertado un renovado interés científico por su capacidad para remediar suelos degradados, mejorar la retención de humedad, reducir la acidez, aumentar la disponibilidad de nutrientes y actuar como sumidero de carbono estable, contribuyendo a la mitigación del cambio climático (Pariona et al., 2020).

El biochar es una alternativa de acción climática, accesible, de bajo costo y sostenible. Su aplicación como enmienda permite incrementar la fertilidad del suelo y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Por ende, es necesario implementar el biochar como tecnología de emisión negativa frente al cambio climático, disminuir los impactos negativos en el ambiente y salvaguardar la salud de las personas (Pariona et al., 2020). El biochar es conocido como una de las tecnologías de bajo impacto (NET) y de bajo costo para el secuestro de CO<sub>2</sub>. Además, se puede emplear como enmienda para la agricultura, lo que contribuye a la mitigación del cambio climático. Gracias al poder recalcitrante (es decir, resistentes a la degradación química y biológica), se convierte en un sumidero potencial de carbono (Pariona et al., 2020).

En Nicaragua, empresas como; BOSNICA S.A en coordinación con la *Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit* (GIZ), ECOM Agroindustrial LTD, MRL Forestal y la estrategia nacional de leña y carbón vegetal impulsada por el Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales (MARENA) fomentan la producción de biocarbón o carbón vegetal y promueven su uso, especialmente entre los productores que implementan sistemas agroforestales con café, demostrando el potencial del biochar en estos sistemas a través prácticas de manejo sostenible. Cabe destacar que la producción de biocarbón constituye solo una parte del sistema productivo de estas empresas, integrándose como una estrategia para agregar valor a los subproductos de la madera y pulpa de café provenientes de las podas en plantaciones forestales y el despulpado del café. Esta práctica se desarrolla dentro de un enfoque de economía circular, orientado a la producción sostenible y ecológica, que busca aprovechar de manera eficiente los recursos naturales y reducir los impactos ambientales asociados a la generación de residuos.

No obstante, la adopción de esta tecnología continúa siendo limitada debido a la falta de mecanismos eficaces de transferencia tecnológica y programas de capacitación local. Ante esta situación, la presente investigación tiene como objetivo identificar los elementos clave para diseñar un modelo de

transferencia tecnológica, que impulse la producción y el uso del biochar como enmienda del suelo en sistemas agroforestales de café en Macuelizo, Nueva Segovia. Este modelo busca fortalecer la sostenibilidad productiva, mejorar la fertilidad de los suelos y promover una agricultura resiliente frente al cambio climático en la región norte de Nicaragua.

## Materiales y métodos

El estudio corresponde a una investigación aplicada, de enfoque mixto, desarrollada mediante parcelas experimentales de campo, con alcance descriptivo-explicativo y carácter longitudinal.

*Área de estudio:* La investigación se desarrolló en las comunidades de Zuzular, Los Plancitos, Los Cordoncillos y Los Papelillos, en el municipio de Macuelizo, departamento de Nueva Segovia, Nicaragua. La zona se caracteriza por condiciones propias del corredor seco, con suelos degradados, baja cobertura forestal y alta vulnerabilidad a la variabilidad climática. El estudio se ejecutó en el período comprendido entre agosto de 2022 y febrero de 2025.

La población estuvo conformada por los productores participantes del proyecto “Alianzas Estratégicas locales para la Adaptación al Cambio Climático en la Cuenca Alta del Río Coco” desarrollado por la empresa BOSNICA S.A en coordinación con GIZ en el marco de la cooperación internacional. La muestra fue de tipo intencional, integrada por 21 productores seleccionados en base a los siguientes criterios: ser productor dedicado al cultivo del café, pequeño productor con una extensión de terreno aproximada de 0.70 hectáreas, estar ubicado en un área caracterizada por suelos degradados y con baja cobertura forestal, presentar bajos ingresos económicos y mostrar disposición para trabajar bajo el enfoque de producción orgánica.

### *Parcelas experimentales y tratamientos*

Para evaluar la sostenibilidad ambiental del biocarbón, se establecieron parcelas experimentales en la finca BOSNICA, con el objetivo de evaluar la sostenibilidad ambiental del biocarbón en comparación con prácticas agrícolas tradicionales. Se definieron cuatro tratamientos: una parcela con cuatro surcos de árboles forestales tratados con biochar (una libra por planta), una parcela con cuatro surcos de plantas forestales tratados con fertilizantes químicos (50 gramos de 18-46-0 por planta), una parcela con cuatro surcos de plantas forestales tratadas con aporcado y una parcela con cuatro surcos de plantas forestales con tratamiento control (testigo).

Las parcelas se establecieron bajo el modelo de tecnología compacta para zona seca, conformada por una secuencia de especies forestales que incluyó mandagual (*Caesalpinia velutina*), caoba (*Swietenia macrophylla*), pochote (*Bombacopsis quinata*), roble macuelizo (*Tabebuia rosea*) y cedro real (*Cedrela odorata*), tecnología utilizada por BOSNICA S.A. en sus programas de reforestación en zonas secas de Nicaragua.

*VARIABLES EVALUADAS.* Las variables del estudio incluyeron: sistemas agroforestales, propiedades físico-químicas del biocarbón, sostenibilidad ambiental del biochar y transferencia tecnológica. La Tabla 1 muestra las variables evaluadas en la investigación.

**Tabla 1***Variables evaluadas en la recolección de datos*

<b>Variable</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Instrumento</b>
<b>Sistemas agroforestales</b>	Tenencia de la tierra	Encuesta a productores
	Rubros y cultivos	Plataforma Taking Root
	Tipos de cultivos	Hoja de observación
	Insumos, bienes y servicios	Programa de Excel
	Ubicación de la finca	
	Factores climáticos	
	Nivel educativo	
<b>Propiedades del biocarbón</b>	Distribución de partículas	Análisis de laboratorio
	Densidad aparente	
	Contenido de humedad	
	Color	
	Cenizas totales, pH, metales, N, P, K, otros micronutrientes	
<b>Sostenibilidad ambiental del biochar</b>	Porcentaje de crecimiento	Flexómetro
	Índice de sobrevivencia y mortalidad de plantas forestales	Fórmula de Ilbay 2012
		Programa de Excel
<b>Transferencia tecnológica</b>	Biocarbón	Entrevista
	Análisis socioeconómico y ambiental de la tecnología	Monitoreo y seguimiento
	Organizaciones, instituciones y empresas interesadas	Organizaciones interesadas
	Actividades y recursos	Numero de protagonistas
	Talleres, cursos y sesiones prácticas	Registro de producción
		Socios y colaboradores
	Ficha técnica	

*Técnicas e instrumentos de recolección de datos*

la recolección de datos en las parcelas experimentales se realizó en cinco períodos de evaluación, con intervalos de cuatro meses. Se aplicaron encuestas estructuradas para la caracterización socioeconómica de los productores y de los sistemas agroforestales. Las condiciones técnicas y socioculturales fueron documentadas mediante recorridos de campo y hojas de observación. Asimismo, se realizaron entrevistas semiestructuradas al personal del Centro de Producción de Biochar y a la dirección ejecutiva de BOSNICA S.A., con el propósito de profundizar en el proceso de producción del biocarbón mediante pirólisis química en reactores y en los procesos de implementación y transferencia tecnológica. Las propiedades físico-químicas del biocarbón, incluyendo distribución de partículas, densidad aparente, contenido de humedad, color, cenizas totales, pH y contenido de macro y micronutrientes (N, P, K, entre otros), fueron determinadas mediante análisis de laboratorio.

### *Procedimiento de medición en parcelas experimentales*

El crecimiento de las plantas forestales se midió en centímetros (cm) utilizando un flexómetro. La sobrevivencia y mortalidad se determinaron mediante conteos directos de plantas vivas y muertas en cada tratamiento. La evaluación del desempeño de los tratamientos se realizó mediante indicadores de sobrevivencia, mortalidad y crecimiento vegetativo. Siguiendo la ecuación (1) propuesta por (Calero, 2021), se determinó el porcentaje de mortalidad, el porcentaje de sobrevivencia se obtuvo como complemento del porcentaje de mortalidad.

$$\% \text{ de mortalidad (turno final)} = \frac{\text{n de plantas vivas al final del experimento}}{\text{n plantas vivas al inicio del experimento}} \times 100 \text{ (1)}$$

Los datos cuantitativos fueron organizados y sistematizados en bases de datos en Microsoft Excel y analizados mediante estadística descriptiva, utilizando frecuencias, porcentajes y medias. El análisis cualitativo de las entrevistas se realizó mediante el método de análisis de contenido, que incluyó la transcripción, codificación y categorización de la información, permitiendo interpretar las percepciones y experiencias de los actores involucrados en la producción, implementación y transferencia del biocarbón.

## **Resultados y discusión**

### *Caracterización socioeconómica de los productores y fincas*

De los 21 productores entrevistados en las comunidades de El Zuzular, Los Plancitos, Los Cordoncillos y Los Papelillos, el 100% posee terrenos propios. La mayoría cuenta con estudios de primaria y secundaria, mientras que un menor porcentaje ha alcanzado formación técnica o educación superior. Este nivel educativo influye directamente en el manejo de las fincas, ya que determina la capacidad para comprender y aplicar nuevas tecnologías, tomar decisiones informadas, optimizar el uso de recursos, adoptar prácticas innovadoras, acceder a programas de apoyo y financiamiento, y promover estrategias ambientalmente sostenibles. En su mayoría, los productores son beneficiarios de los programas de reforestación de la empresa BOSNICA S.A, institución que constituye la principal fuente de apoyo técnico y provisión de recursos en la zona. Solo dos productores reciben asistencia del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).

En cuanto a servicios básicos el 100% de los productores entrevistados dispone de energía eléctrica. El acceso a este servicio influye directamente en la productividad de las fincas, ya que la energía eléctrica permite la utilización de herramientas y sistemas de riego más eficientes, además de facilitar el almacenamiento y conservación de productos agrícolas. En cuanto a la infraestructura vial, el 62% de los productores cuenta con caminos en buen estado, lo que facilita el transporte de insumos y la comercialización de las cosechas, reduciendo costos y tiempos de traslado. En contraste, el 38% restante enfrenta vías en condiciones precarias, lo que limita su movilidad, encarece el transporte y dificulta tanto el abastecimiento de insumos como la colocación de sus productos en el mercado.

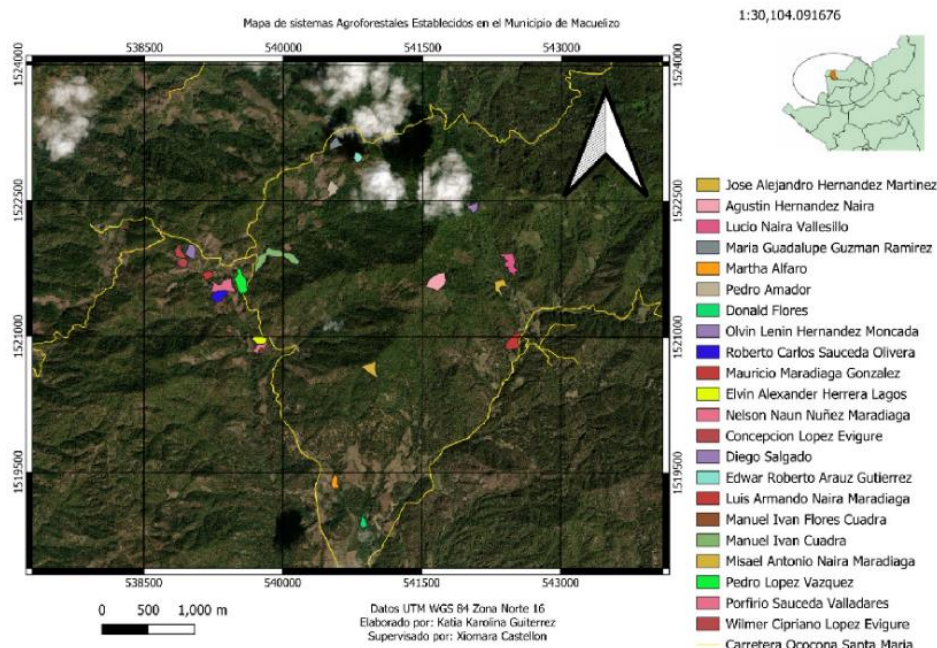
Las principales fuentes de abastecimiento de agua en las comunidades de Macuelizo son el agua potable, los pozos artesanales y los manantiales. Disponer de fuentes hídricas confiables resulta fundamental para asegurar el riego oportuno de los cultivos durante los períodos de sequía y para satisfacer las necesidades domésticas de las familias. Estos factores son determinantes no solo para optimizar la producción agrícola, sino también para fortalecer el bienestar y la calidad de vida de los productores rurales de Macuelizo Nueva Segovia.

*Características productivas y sistemas agroforestales*

Los sistemas agroforestales son básicamente una combinación entre prácticas forestales con agricultura y/o pastoreo sobre la misma unidad de superficie. Estos sistemas se han implementado con el objetivo de reducir la pobreza rural, mejorar la seguridad alimentaria, aumentar los ingresos familiares, mejorar la productividad y contribuir al aprovechamiento sustentable de los ecosistemas y la biodiversidad. Los sistemas agroforestales pueden mejorar la fertilidad del suelo, proteger los cultivos del viento, restaurar las tierras degradadas, mejorar la conservación del agua, limitar el desarrollo de las plagas y evitar la erosión del suelo (Secretaría de agricultura y desarrollo rural, 2020). Con este propósito, se establecieron sistemas agroforestales con café en el municipio de Macuelizo, Nueva Segovia. La Figura 1 muestra la distribución de estos sistemas por productor en las comunidades mencionadas.

**Figura 1**

*Mapa de los sistemas agroforestales establecidos en el Municipio de Macuelizo Nueva Segovia*



El 90% de los productores entrevistados posee fincas con una extensión promedio de 3 a 3.5 hectáreas, lo que indica que la mayoría opera como pequeños productores. Por otro lado, solo el 10% de los

productores dispone de superficies mayores, alcanzando aproximadamente 24.6 hectáreas, lo que les permite diversificar cultivos, implementar estrategias de manejo más intensivas y beneficiarse de economías de escala. Esta distribución evidencia una marcada heterogeneidad en el tamaño de las fincas. De esta superficie de terreno, cada productor destina en promedio 1.3 hectáreas al establecimiento de sistemas agroforestales con café (variedad Parainema), empleando el resto principalmente para la siembra de granos básicos como maíz, frijol y en menor escala hortalizas y musáceas. La fertilización de las plantaciones de café se realiza mediante insumos orgánicos como biochar, lombricompost, Bocashi y la incorporación directa de pulpa de café al suelo, prácticas que contribuyen a la mejora de la fertilidad y sostenibilidad del sistema productivo, la Figura 2 muestra que las plantas manejadas con biochar presentan mayor desarrollo en comparación con una planta manejada con fertilizante.

## Figura 2

*Planta de café sin biochar y planta de café con biochar en un sistema agroforestal*



*Nota: de izquierda a derecha, planta de café tratada sin biochar y planta tratada con biochar.*

En los terrenos con alta pendiente se implementa el sistema de siembra en curva a nivel con el método de tres bolillos<sup>1</sup>, para evitar la erosión del suelo. También han establecido obras de conservación de suelo y agua como las barreras vivas, acequias, cortinas rompeviento, diques de contención y barreras vivas con abonos verdes. Por otra parte, el arreglo del sistema forestal con café se realiza estableciendo el cultivo con especies de árboles tanto maderables como energéticas, esto con el objetivo de proveer la sombra en el sistema agroforestal. Este sistema tiene una función o rol principal

<sup>1</sup> El sistema de siembra tresbolillo o de triángulo, es aquel en el cual cada 3 plantas forman un triángulo equilátero.

de proveer servicios ecosistémicos tales como suministro de materia orgánica, energía o alimento, regulación ambiental, hábitat o servicios de soporte; es decir espacios vivos para plantas y animales que mantienen la diversidad de los mismos y servicios culturales que incluyen los beneficios no materiales, como beneficios estéticos, espirituales y psicológicos, entre otros (Castro & Estéves, 2021). En los sistemas agroforestales observados predominan especies arbóreas como: *cedrela odorata*, *Tabebuia rosea* y *Inga edulis*. La presencia de estos árboles aporta múltiples beneficios al cultivo de café, ya que proporcionan sombra regulando la temperatura y la humedad del microclima, favorecen la conservación del suelo y la retención de agua, y contribuyen a la biodiversidad al ofrecer hábitat para la fauna benéfica. Además, sus hojas y restos orgánicos enriquecen el suelo con materia orgánica, mejorando la fertilidad y reduciendo la necesidad de insumos externos.

La mayor parte de la producción de café se destina a la comercialización, constituyendo la principal fuente de ingresos de las unidades familiares. Una porción más reducida se utiliza para el autoconsumo y la venta en mercados locales. Los demás cultivos presentes en la finca se destinan exclusivamente al autoconsumo, contribuyendo al abastecimiento familiar y a la seguridad alimentaria. Este manejo agroforestal contribuye a la economía circular, ya que los residuos orgánicos del café, como la pulpa y la cáscara, se reincorporan al sistema como abono o compost, cerrando el ciclo de nutrientes, reduciendo desperdicios y mejorando la fertilidad del suelo de manera sostenible.

La tecnología aplicada en los sistemas agroforestales con café en el municipio de Macuelizo, Nueva Segovia se centra en prácticas sostenibles; destacando el uso de enmiendas orgánicas y la implementación de obras de conservación de suelo y agua, con el objetivo de mejorar la fertilidad del terreno, preservar los recursos naturales y garantizar la productividad a largo plazo.

### *Producción y calidad del biochar*

La producción de biochar como tecnología innovadora en Nicaragua, implica la pirolización de materiales orgánicos para obtener un producto carbonizado que se puede utilizar en aplicaciones agrícolas para mejorar la calidad del suelo. Este tipo de carbón vegetal se produce a través de la pirólisis de biomasa, que es un proceso de deshidratación térmica en ausencia de oxígeno. Este material tiene propiedades únicas que lo hacen valioso en diversas aplicaciones, especialmente en la agricultura y la gestión sostenible de recursos naturales. La empresa BOSNICA S.A, cuenta con el personal capacitado y la tecnología necesaria para la producción de biochar. A continuación, se describen los pasos que se llevan a cabo en la elaboración del biochar en el centro de producción.

*Selección de materias primas:* Para obtener biochar de alta calidad, es crucial considerar la biomasa utilizada en su producción. Las propiedades fisicoquímicas del biochar, como la porosidad, el contenido de aniones y cationes intercambiables, el contenido de humedad, entre otras, son factores determinantes. Estas propiedades no solo dependen de la tecnología empleada en su producción, sino también del tipo de materia prima utilizada y de las condiciones de temperatura durante el proceso de elaboración. (Shariat et al., 2020). La biomasa es un factor determinante en la estabilidad del biocarbón, dado que su composición de celulosa, hemicelulosa y lignina contiene estructuras de niveles de complejidad diferentes entre ellos, por lo que en el proceso de pirólisis la pared celular comienza destruyéndose para luego dar paso a la descomposición de la celulosa y la hemicelulosa, lo que genera un carbono amorfo no estable. En este punto de descomposición la degradación de la

lignina aromatiza la estructura permitiendo la formación de una estructura estable (Li et al., 2021). Por lo tanto, las características de la biomasa influyen en la calidad del biochar.

En el centro de producción de BOSNICA se produce biocarbón mediante un proceso de pirólisis de madera (biomasa vegetal) proveniente de los sistemas agroforestales y forestales que la empresa ha establecido en coordinación con productores de los municipios de Somoto y San Juan de Limay, ubicados en los departamentos de Madriz y Estelí.

En donde, el aprovechamiento de la biomasa forestal se realiza en cumplimiento del artículo 3 de la normativa nacional sobre permisos de aprovechamiento forestal, el cual regula el uso de residuos forestales por personas naturales o jurídicas con derechos legalmente establecidos, previa inspección interinstitucional, garantizando que la obtención de la materia prima se lleve a cabo bajo criterios de legalidad y sostenibilidad ambiental (La Gaceta, 2019).

*Trituración y Preparación:* Las materias primas se trituran o cortan en trozos pequeños para aumentar la eficiencia del proceso de pirolización. La preparación también puede incluir la eliminación de impurezas y la homogeneidad del material facilitando una descomposición térmica más uniforme y completa. Los biochares generados a partir de biomasa previamente triturada y homogeneizada presentan mayores áreas superficiales (Mankar et al., 2021), mayores capacidades de adsorción de partículas contaminantes (Liao & Thomas, 2019) y de nutrientes (Zhou et al., 2021).

*Pre secado:* El presecado de la materia prima se realiza en la cámara de secado o en la cámara pirolítica, aplicando calor de manera controlada. Durante este proceso, la temperatura de la madera aumenta gradualmente, lo que permite la liberación progresiva del agua contenida, preparando así la biomasa para una pirolisis más eficiente.

*Procesos de pirolización:* Es una descomposición térmica a elevada temperatura que se da entre los 300 y 600 °C (Noteno & Zapata, 2022). Los materiales se someten a un proceso de pirólisis, el cual constituye una etapa clave en la conversión de la biomasa en carbón y subproductos de interés. La pirólisis lenta de biomasa a temperaturas comprendidas entre 350 y 600 °C se considera el mejor método para la producción de biocarbón (Tan et al., 2024) citado en (Celis et al., 2025). Durante este proceso termoquímico se liberan gases y líquidos que, mediante su captura y aprovechamiento, pueden emplearse en la generación de energía o en la síntesis de compuestos químicos de alto valor, tales como el ácido piroleñoso y el alquitrán. La carbonización se lleva a cabo en hornos herméticos, comúnmente denominados reactores de pirólisis. Estos equipos están diseñados para resistir las elevadas temperaturas y presiones propias del proceso, garantizando así la estabilidad y eficiencia en la transformación de la biomasa.

*Control de Temperatura y Tiempo:* El control de la temperatura y el tiempo de pirolización constituye un factor determinante en las propiedades finales del biocarbón. En general, temperaturas más elevadas favorecen la formación de un material con mayor finura y porosidad, mientras que condiciones de menor temperatura permiten conservar en mayor medida la estructura original de la biomasa. El aumento de temperatura y presión en la cámara pirolítica provoca la transformación de la biomasa en carbón vegetal, gases y líquidos. Los compuestos volátiles liberados pueden aprovecharse para generar energía o productos químicos, mientras que el control de estas condiciones garantiza la calidad de los subproductos y la seguridad del proceso (Martínez, 2020).

*Recolección de Gases y Líquidos:* Durante la pirólisis, los gases y líquidos generados, conocidos como gases de síntesis y alquitrán, pueden ser recolectados y utilizados como subproductos o fuentes de energía. Los compuestos volátiles condensables se obtienen en forma de aceites y alquitranes, mientras que los volátiles no condensables constituyen gases de alto poder energético que pueden aprovecharse para mantener la temperatura de la cámara pirolítica. Los gases volátiles excedentes son aprovechados en procesos de pre secado de la madera.

*Enfriamiento y Manipulación:* Al finalizar la fase Pirolítica la presión de la cámara disminuye, de igual forma la producción de compuestos volátiles. Después del proceso de pirolización, el carbón vegetal se enfría antes de manipularlo y almacenarlo como se muestra en la (Figura 3). Este enfriamiento puede ocurrir en la misma unidad de pirolización o en un sistema separado en un periodo de 24 horas (Martínez, 2022).

### Figura 3

*Proceso de producción y enfriamiento del carbón vegetal*



*Fuente: Empresa Bosques Nicanada S.A (BOSNICA S.A)*

*Tamizado y clasificación:* El carbón vegetal se tritura, tamiza y clasifica para obtener un producto de tamaño uniforme en partículas más pequeñas, el cual es utilizado para la producción del biochar (biochar). La producción del biochar se obtiene de someter el carbón resultante de la pirolisis a procesos de purificación y activación para mejorar sus propiedades físicas y químicas.

*Mezcla del carbón vegetal con otros ingredientes:* Por sí mismo, el carbón vegetal no es un fertilizante o una enmienda mejoradora del suelo. Por esta razón debe ser mejorado o enriquecido para optimizar sus propiedades físicas, químicas y biológicas, con el fin de aumentar su eficiencia en aplicaciones específicas.

El carbón se enriquece por la adición de: Fuentes de calcio, fósforo, potasio y/o nitrógeno, que proporcionan nutrientes. Minerales como zeolitas, óxidos metálicos, silicatos. Compuestos orgánicos: ácidos húmicos y fúlvicos. Microorganismos, bacterias, hongos, compostas, humus que ayudan a descomponer materia orgánica, fijar nitrógeno y mejorar la disponibilidad de nutrientes. Estos y otros

aditivos le permitan al biochar tener los recursos necesarios para el crecimiento de las plantas. De esta forma, el uso de biochar mejorado contribuye a reducir la dependencia de fertilizantes químicos y su producción puede ser económicamente viable (Sánchez et al., 2025).

De esta manera, el carbón vegetal se convierte en biocarbón (biochar) mediante el enriquecimiento de su contenido de micronutrientes, agregando ingredientes como: leche, melaza, cal, estiércol de ganado y agua. Una vez triturado el carbón, se mezcla con estiércol de ganado seco y desintegrado, melaza, leche, cal y agua. Todos los ingredientes se integran hasta obtener una mezcla homogénea, la cual se agita cada dos días durante 15 días para garantizar una correcta incorporación de los componentes. Este proceso tiene como propósito mejorar la calidad del suelo y aumentar la productividad de los cultivos, además de ofrecer una alternativa más sostenible que contribuya a reducir el uso de fertilizantes químicos.

*Almacenamiento:* El biochar debe almacenarse en lugares secos y resistentes al fuego, con el fin de conservar sus propiedades y evitar la degradación (Figura 4). Además, el almacenamiento prolongado puede favorecer la estabilización de su estructura y mejorar la capacidad de retención de nutrientes y agua, aumentando su eficacia como mejorador del suelo.

#### Figura 4

*Secado y almacenamiento del biochar*



*Análisis de Calidad:* Se realizan estudios de calidad para evaluar las propiedades físicas y químicas del biochar en el laboratorio de suelos y agua de la universidad Agraria de Nicaragua (UNA). Los resultados más recientes del análisis de nutrientes contenidos en el biochar se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 2***Contenido de nutrientes del biochar (mezcla de carbón, melaza y estiércol).*

<b>Tipo de nutrientes</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Medida</b>
<b>pH</b>	8.15	
<b>Conductividad eléctrica</b>	3,068.00	μS/m
<b>Ceniza</b>	52.75	%
<b>Materia orgánica (MO)</b>	14.15	%
<b>Humedad</b>	5.77	%
<b>Nitrógeno (N)</b>	0.67	%
<b>Fósforo (P)</b>	0.02	%
<b>Potasio (K)</b>	1.27	%
<b>Calcio (Ca)</b>	1.56	%
<b>Magnesio (Mg)</b>	0.27	%
<b>Hierro (Fe)</b>	6,955.00	ppm
<b>Cobre (Cu)</b>	890.00	ppm
<b>Manganeso (Mn)</b>	457.50	ppm
<b>Zinc (Zn)</b>	92.50	ppm

*Nota: Información obtenida del análisis del laboratorio del biochar realizado por la (BOSNICA S.A), en el 2021.*

De acuerdo a los datos obtenidos, el biochar es un mejorador de suelo, que al aplicarlo, mejora la vida microbiana, activa los micronutrientes como el Zinc y el calcio que no están disponible para la planta, tiene una gran capacidad de conductividad eléctrica e intercambio catiónico, permite que estos nutrientes que no están disponibles para su aprovechamiento se activen y se transfieran a la planta, también el carbón por naturaleza es absorbente, lo que hace que el biochar absorba agua y nutrientes y los mantenga disponible para la planta por más tiempo.

En Nicaragua, el biochar presenta importantes oportunidades de adopción como tecnología sostenible, ya que contribuye a la rehabilitación de suelos degradados o contaminados, incrementando su productividad; mejora la oxigenación y la permeabilidad del terreno, favoreciendo el desarrollo de raíces más fuertes y cultivos más saludables; y constituye un producto sostenible y competitivo, alineado con prácticas agrícolas ambientalmente responsables. El biocarbón se puede utilizar como biorremediación en el tratamiento de aguas residuales, también en la elaboración de filtros para mejorar la calidad del agua para consumo humano (Martínez, 2020).

#### *Comparación de emisiones de carbono: Biochar vs Fertilizante químico*

Tomando como referencia 45 kg de biochar en comparación con 45 kilogramos de fertilizante químico, (Tabla 3) se analizó las emisiones de CO<sub>2</sub> en ambos productos, encontrando que el biochar, al contener aproximadamente un 70% de carbono en su estructura, actúa como un sumidero de carbono capaz de capturar y almacenar alrededor de 115,5 kg de CO<sub>2</sub> por cada 45 kg aplicados al suelo. En contraste, la misma cantidad de fertilizante químico; que genera entre 270 y 400 kg de CO<sub>2</sub>, tanto de su proceso de fabricación intensivo en energía, como de la liberación de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) durante su uso agrícola.

**Tabla 3**

*Comparación de emisiones de carbono: Biochar vs Fertilizante químico (45 kg)*

Tipo de insumo agrícola	Contenido de Carbono	Balace de CO <sub>2</sub> equivalente	Efecto climático
<b>Biocarbón</b>	~31.5 kg C (≈70%)	-115,5 kg CO <sub>2</sub> (capturados y almacenados en el suelo)	Captura y secuestro de carbono
<b>Fertilizante químico</b>	-	+270 a 400 kg CO <sub>2</sub> (fabricación + liberación de N <sub>2</sub> O en campo)	Elevadas emisiones de gases de efecto invernadero

*Nota: Datos obtenidos en el libro biocarbón para la gestión ambiental ((Lehmann y Joseph, 2024) impacto ambiental de los fertilizantes (Cisneros & Nonones, 2024) y perspectivas agrícolas (OECD/FAO, 2019).*

Esto significa que, el biocarbón contribuye no solo al crecimiento de las plantas, sino que también directamente en la mitigación del cambio climático, los fertilizantes químicos representan una fuente neta de emisiones de gases de efecto invernadero y la incorporación de biochar en sistemas agrícolas como sustituto parcial o complementario a los fertilizantes químicos, mejora la fertilidad del suelo y la retención de nutrientes, su uso contribuye a reducir la huella de carbono del sector agrícola.

Tomando en cuenta los beneficios ecológicos del biochar, también es fundamental resaltar las ventajas económicas que este aporta. Su aplicación no solo contribuye a mejorar la calidad y salud del suelo, sino que además permite al productor reducir de manera significativa los gastos destinados a la compra recurrente de fertilizantes químicos. A continuación, la (Tabla 4) detalla los costos anuales asociados a la fertilización química del café, considerando tanto los fertilizantes foliares como los fertilizantes del suelo.

**Tabla 4**

*Plan anual de fertilización química de una plantación de café en desarrollo*

Fertilización	Meses	Producto	U/m	Dosis	Costo/Prod
	Junio	18-46-0 (DAP)	Kg	0.5 onza/trasplante	2,060.00
<b>Fertilización del suelo</b>	Junio	DALOMAG	K	1 onza/planta	470.00
	Julio	Nema-Killer	Kg	100 cc/planta	1,260.00
	Septiembre	18-46-0 (DAP)	Kg	0.5 onza/planta	2,060.00
	Octubre	18-46-0 (DAP)	Kg	0.5 onza/planta	2,060.00
	Octubre	Urea	Kg	0.5 onza/planta	1,520.00
<b>Total</b>					<b>9,430.00</b>

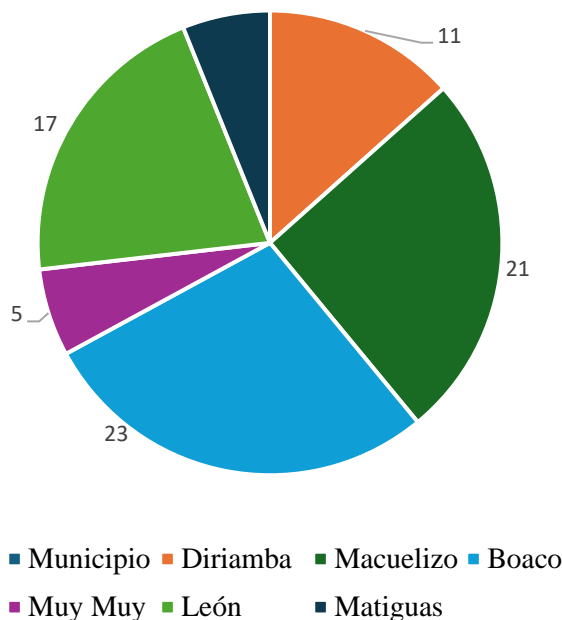
Fertilización	Meses	Producto	U/m	Dosis	Costo/Prod
<b>Fertilización foliar</b>	2 meses /DDS	Micro Max	lt	500 cc/ barril	690.00
		Terra (Mg)			
		Algamar	gr	200 gr/barril	260.00
	4 meses/DDS	Mayoral Terra	lt	500 cc/ barril	660.00
		(NPK)	lt	25 cc/barril	1,100.00
		Cobre Max			
6 meses/DDS	Mayoral Terra	Lt	500 cc/ barril	660.00	
	(NPK)		500 cc/ barril	690.00	
	Vital Terra (CaO)				
<b>Total</b>					<b>4,060.00</b>
<b>Total, de gastos por año</b>					<b>13,490.00</b>

*Nota: Plan de fertilización química que se lleva a cabo en las plantaciones de café en la empresa BOSNICA S.A.*

En términos económicos, el uso del biochar constituye una alternativa estratégica para disminuir los costos de producción en los sistemas cafetaleros. A diferencia de los fertilizantes químicos, que requieren aplicaciones constantes y representan un gasto elevado año con año, el biochar contribuye a reducir progresivamente esta dependencia. La Tabla muestra los gastos anuales en fertilización química del suelo y foliar de un productor de café, los cuales ascienden a C\$ 13,490.00. Si se proyecta este monto a un período de 10 años, el gasto alcanzaría aproximadamente C\$ 134,900.00, lo que refleja una carga económica considerable para los productores. A partir de los evidentes beneficios obtenidos del biochar, se proyectó la transferencia de la tecnología del biochar a los productores que implementan sistemas forestales y agroforestales. En total, 82 productores han establecido 303 hectáreas utilizando biochar como enmienda, tanto en cultivos forestales como agroforestales. En la (Figura 5) se muestra la distribución del número de productores por municipio que emplean esta tecnología.

**Figura 5**

*Productores que utilizan Biochar en los sistemas forestales y agroforestales, en diferentes municipios de Nicaragua*



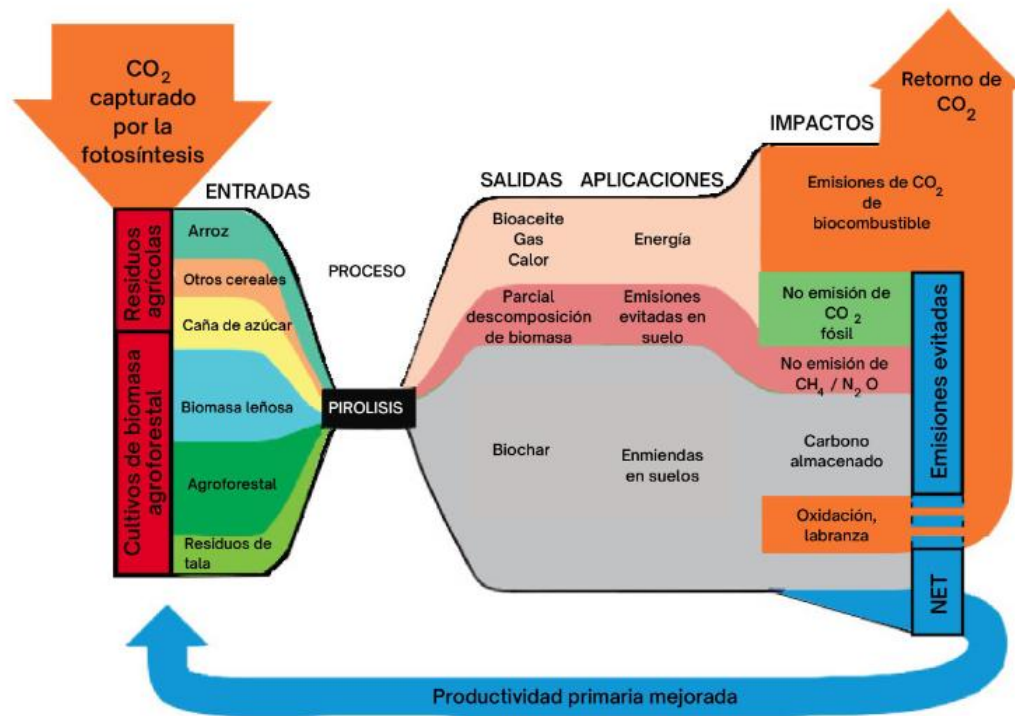
*Transferencia tecnológica de biochar en sistemas agroforestales*

El desarrollo de la producción agropecuaria en Nicaragua en los últimos años ha sido un verdadero motor de crecimiento y progreso para el país. A través de centros especializados; se ha logrado impulsar la agricultura y la ganadería de manera significativa. Estos centros tecnológicos de desarrollo se dedican a la investigación aplicada, buscando implementar nuevas tecnologías y actividades de transferencia que respondan a las necesidades y oportunidades de desarrollo social y económico del país (Romero, 2023).

En este contexto, y tomando como problemática los suelos degradados del norte de Nicaragua la empresa BOSNICA S.A, cuya misión es “mejorar los medios de vida de las familias mediante la restauración de los bosques” impulsa el uso del biochar como una tecnología sostenible y emergente para el sector rural del país. La tecnología del biochar busca promover su adopción sostenible en sistemas agroforestales de Nicaragua mediante la transferencia de conocimientos y la implementación de prácticas de producción, manejo y aplicación. Este enfoque fortalece las capacidades de los productores, optimiza el uso de recursos y contribuye a la sostenibilidad ambiental y productividad de las fincas. La Figura 6 ilustra el funcionamiento del sistema de producción y aplicación del biocarbón (biochar) como estrategia de mitigación del cambio climático, a partir del aprovechamiento de biomasa vegetal.

**Figura 6**

*Modelo de transferencia tecnológica para la aplicación del biocarbón en sistemas agroforestales en Macuelizo, Nueva Segovia*



*Nota. Imagen obtenida de Pariona et al., (2020). Biochar como tecnología de emisión negativa frente al cambio climático.*

La transferencia de tecnología es un proceso que implica la realización de cambios en los procesos de producción ya sea por conversión, adecuación o aplicación de las ideas innovadoras, las cuales deben generar un beneficio para el pequeño productor (Cruz et al, 2025). La implementación de la transferencia de tecnología marca el punto en el cual la tecnología comienza a utilizarse en el nuevo entorno. Es esencial llevar a cabo una evaluación continua para monitorear su rendimiento, identificar posibles ajustes y optimizar su aplicación. La retroalimentación constante de los usuarios finales y el seguimiento de indicadores clave son componentes fundamentales en esta fase (Sánchez, 2024).

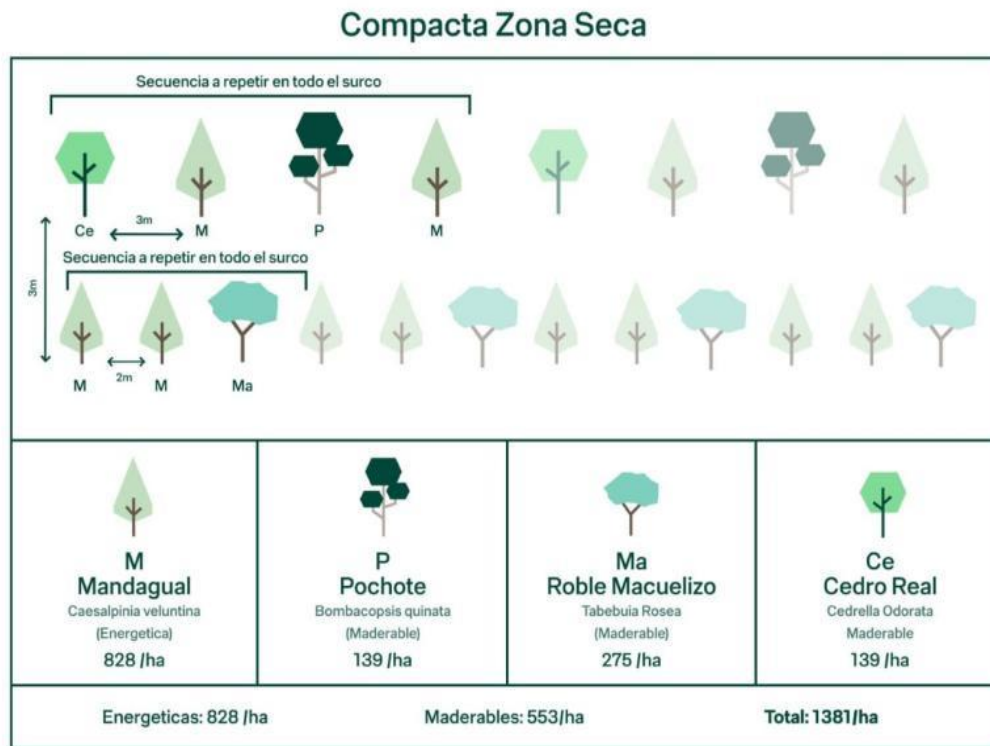
Desde el punto de vista del sector agropecuario, la transferencia de tecnología debe abarcar las prácticas agrícolas adecuadas, las cuales implican la adopción y aplicación de conocimientos disponibles para garantizar la sostenibilidad de los recursos necesarios para la producción agrícola, tanto para alimentos como para otros fines, teniendo en cuenta la viabilidad económica y la estabilidad social (FAO, 2022) citado en (Sánchez, 2024).

Por lo tanto, se planea la transferencia de la tecnología del biochar a los 6,921 productores socios de BOSNICA S.A, que tienen establecidas 20,793 hectáreas de plantaciones forestales y agroforestales distribuidas en 114 municipios de Nicaragua. El creciente interés por la tecnología ha impulsado la ampliación de la capacidad de producción mediante la construcción de dos nuevos reactores en Limay

y Boaco, permitiendo satisfacer la demanda de biochar, consolidar oportunidades de negocio y promover prácticas agrícolas sostenibles, no solo entre los socios, sino también en cooperativas cafetaleras y otras organizaciones de Nicaragua interesadas en esta tecnología.

*Evaluación de la sostenibilidad:* Se evaluó la sostenibilidad ambiental del uso de biochar mediante un experimento desarrollado en la finca BOSNICA, con la siguiente secuencia de árboles forestales (Figura 7).

**Figura 7**  
Diseño forestal empleando la tecnología compacta zona seca



*Fuente: Taking Root, (2025). Diseños forestales y gestión de parcelas*

La tecnología compacta de zona seca se caracteriza por el establecimiento de plantaciones de alta densidad, conformadas por especies mixtas y orientadas a múltiples fines forestales. Este diseño es el más utilizado y destaca por su elevada capacidad de captura de carbono. En virtud de estas características, dicha tecnología fue seleccionada para el establecimiento del experimento, ya que, presenta una adecuada adaptación a las condiciones climáticas de la zona seca del municipio de Somoto, departamento de Madriz, donde se localiza la finca de BOSNICA. La Tabla 5 muestra el número de plantas establecidas, así como el registro de plantas vivas y muertas y el promedio de crecimiento en cada parcela a lo largo del experimento.

**Tabla 5***Análisis comparativo de las observaciones en las parcelas experimentales en la finca BOSNICA*

Parcelas	Plantas sembradas	Plantas vivas	Plantas muertas	Promedio de crecimiento (cm)	% de sobrevivencia	% de mortalidad
<b>Parcela con biochar</b>	88	86	2	168	97.73	2.27
<b>Parcela con fertilizante</b>	85	71	14	123	83.53	16.47
<b>Parcela con aporcado</b>	91	78	13	124	85.71	14.29
<b>Parcela testigo</b>	86	48	38	80	74.42	25.58

Los hallazgos del presente estudio confirman la eficacia del biochar como enmienda para mejorar el desarrollo de las plantas en sistemas forestales y agroforestales, coincidiendo con investigaciones previas que destacan su capacidad para optimizar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Escobar y Carlosama, (2021) en su investigación sobre el impacto del biocarbón sobre el suelo agrícola señalan que; El biocarbón puede aumentar el pH del suelo y mejorar la capacidad de intercambio catiónico, ayudando a que el suelo retenga mejor los nutrientes. Su estructura química permite almacenar carbono por más tiempo y disminuir las emisiones como el óxido nitroso.

Además, como es una materia orgánica estable, modifica positivamente la actividad y diversidad microbiana del suelo, favoreciendo procesos ecológicos importantes y mejorando el crecimiento de las plantas. El elevado porcentaje de sobrevivencia (97,73%) y el notable crecimiento promedio (168 cm) registrados en la parcela tratada con biochar sugieren que esta enmienda actúa como un regulador de humedad y un facilitador de nutrientes, factores claves en condiciones donde el estrés hídrico y la fertilidad limitada del suelo representan desafíos recurrentes.

Por otro lado, los tratamientos con fertilizante químico y aporcado mostraron mejoras importantes respecto al testigo, pero con resultados inferiores al biochar. El aporcado contribuyó a mejorar la aireación del suelo y el manejo de malezas, mientras que el fertilizante proporcionó nutrientes de rápida disponibilidad. Sin embargo, ambos tratamientos carecen del efecto multifuncional del biochar, cuya estructura porosa favorece los procesos de retención y liberación gradual de nutrientes, además de promover la actividad microbiana beneficiosa.

La parcela testigo, con los valores más bajos de sobrevivencia (74,42%) y crecimiento (80 cm), evidencia la necesidad de implementar prácticas de manejo que mejoren la estructura y fertilidad del suelo. Esto confirma que, en ausencia de intervención, las condiciones naturales del sitio no son suficientes para garantizar un desarrollo óptimo de las plantas. En conjunto, los resultados respaldan la incorporación del biocarbón como una estrategia eficiente y sostenible para mejorar los sistemas forestales y agroforestales, especialmente en contextos donde la productividad se ve afectada por

suelos degradados o con baja disponibilidad de nutrientes. Su desempeño superior frente a los tratamientos tradicionales enfatiza su potencial como tecnología clave para la adaptación agrícola al cambio climático y la restauración de suelos.

*Aspectos productivos:* La principal fuente de biomasa para producir biochar es la madera proveniente de podas en los bosques artificiales establecidos por la empresa BOSNICA S.A y productores de Madriz y Estelí. Para que los productores puedan aprovechar esta madera, primero deben inscribir sus parcelas en el Instituto Nacional Forestal (INAFOR), lo que implica revisar la documentación del terreno, presentar la solicitud y someterse a una inspección técnica. Una vez aprobada, reciben la certificación que les permite realizar el aprovechamiento forestal sostenible, seleccionando únicamente los árboles listos para ser utilizados. La madera obtenida se destina a la producción de biochar, así como a la fabricación de muebles y artesanías. Actualmente, 138 productores de Madriz certificados por el INAFOR abastecen de biomasa al centro de producción BOSNICA. El 100% de este carbón se transforma en biochar, logrando una producción de 158.5 toneladas, es decir, 3,504 sacos de 45 kilos de biochar.

Existen diversas fuentes de materias primas para la producción de biocarbón, las cuales pueden ser utilizadas dentro de una economía circular, así lo señala (López & Moreno, 2020) “el biocarbón de pulpa se postula como un producto sostenible y a su vez como una estrategia de producción más limpia que cumple con las especificaciones dadas desde el enfoque de la economía circular, un residuo orgánico que es tomado como materia prima para ser transformado y finalmente reincorporado a los diferentes procesos de la industria agrícola; como un producto orgánico capaz de contribuir al mejoramiento y productividad sobre las características físicas, químicas y biológicas del suelo, minimizando los impactos negativos provenientes de la recurrente utilización de fertilizantes inorgánicos generando beneficios ambientales y a su vez socioeconómicos”. Nicaragua, al ser un país eminentemente agropecuario, puede aprovechar los diversos desechos generados en los procesos de producción agrícola para mejorar sus subproductos y promover la economía circular, una estrategia clave en la agricultura moderna.

*Evaluación de riesgos y desafíos:* Los principales riesgos y desafíos en la implementación de la tecnología de biochar se relacionan con la disponibilidad de materias primas. En primer lugar, la biomasa depende de parcelas certificadas por el INAFOR para el manejo forestal sostenible, sin embargo, se pueden explorar otras fuentes de biomasa para la producción de biochar, como la pulpa de café, uno de los principales residuos generados en los sistemas agroforestales de Nicaragua. En segundo lugar, el estiércol presenta limitaciones estacionales, ya que durante la época lluviosa (mayo-octubre) su recolección se dificulta por el exceso de agua. Asimismo, la capacidad de producción está condicionada al número de reactores disponibles; actualmente operan tres, pero el incremento de la demanda implicaría construir más unidades, lo que representa altos costos de inversión, operación y mantenimiento.

*Apoyo gubernamental:* De acuerdo con las políticas del Gobierno orientadas a fortalecer la Seguridad y Soberanía Alimentaria y Nutricional (SSAN), vinculadas a la Política Agropecuaria y al uso sostenible de los recursos naturales, se han desarrollado acciones estratégicas para articular la tecnología del biochar con los objetivos nacionales de producción agroalimentaria. Estas políticas promueven la asistencia técnica, la capacitación, la innovación productiva y la implementación de

prácticas que garanticen la sostenibilidad de la tierra, el agua y los bosques, priorizando la producción de alimentos sanos e inocuos (Gobierno de Reconciliación Unidad Nacional, 2021).

En este marco, se estableció contacto directo con instituciones clave como el Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales (MARENA) y el Instituto Nacional Forestal (INAFOR), con el propósito de obtener certificaciones y resoluciones que faciliten el establecimiento de plantaciones y el aprovechamiento forestal en zonas de amortiguamiento. Asimismo, se programaron reuniones con el Ministerio de Agricultura (MAG) y el Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria (INTA) para presentar la tecnología del biochar y sus beneficios, destacando su aporte al incremento de la productividad agrícola y a la sostenibilidad ambiental. Complementariamente, la participación en ferias y eventos gubernamentales organizados por INAFOR y otras entidades, ha permitido la divulgación de esta tecnología y la generación de oportunidades de colaboración interinstitucional para su implementación.

*Monitoreo y evaluación:* La evaluación del proceso de transferencia tecnológica del biochar se fundamenta en la medición de indicadores de desempeño tales como la cantidad de biochar producido, el nivel de adopción por parte de los productores y los impactos ambientales y económicos generados. Para ello, se estableció una línea base mediante la recopilación de datos iniciales previos a la transferencia de la tecnología. Posteriormente, se implementó un sistema de monitoreo continuo; apoyado en entrevistas, encuestas, observaciones de campo y registros de producción, complementado con evaluaciones periódicas de impacto que consideran variables como la productividad agrícola, la salud del suelo y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Este proceso culmina con la elaboración de informes de avance que documentan los logros alcanzados, los desafíos enfrentados y las lecciones aprendidas, asegurando una comunicación efectiva con las partes interesadas.

## Conclusiones

La investigación evidencia que los sistemas agroforestales establecidos en Macuelizo presentan condiciones adecuadas para la incorporación del biochar, debido a que los productores cuentan con fincas propias, acceso a servicios básicos, infraestructura vial aceptable y prácticas tradicionales de manejo sostenible. Sin embargo, el nivel educativo y las limitaciones económicas influyen en la capacidad de adopción tecnológica, por lo que la transferencia debe considerar estrategias de capacitación adaptadas al contexto local.

El estudio confirma que la empresa BOSNICA SA posee la capacidad técnica para producir biochar mediante pirólisis controlada de biomasa forestal certificada, generando un insumo de alta calidad con propiedades fisicoquímicas favorables para la recuperación de suelos degradados. Asimismo, la producción de biocarbón representa una alternativa ambientalmente sostenible, alineada con los principios de economía circular y con potencial para diversificar subproductos, reducir residuos y fortalecer cadenas de valor rurales.

Los resultados obtenidos en las parcelas experimentales, indican que el biochar supera a los tratamientos convencionales en términos de sobrevivencia de plantas, crecimiento y mejora de las

propiedades del suelo. La parcela tratada con biochar registró el mayor crecimiento promedio y la menor mortalidad, evidenciando su capacidad para mejorar la disponibilidad de nutrientes, retener humedad y promover la actividad microbiana beneficiosa. Además, su aplicación contribuye a la mitigación del cambio climático mediante el secuestro de carbono, reduciendo hasta en un 100% las emisiones asociadas a fertilización química.

Se identificó que la transferencia tecnológica del biochar requiere una articulación efectiva entre productores, instituciones gubernamentales, empresas privadas y organismos de cooperación. Factores como la disponibilidad de biomasa certificada, la capacidad operativa de los reactores, el acceso a formación técnica y el acompañamiento continuo son determinantes para garantizar la adopción y sostenibilidad del modelo. La inclusión de mecanismos de seguimiento, evaluación e incentivos productivos facilitará la escalabilidad de la tecnología en los 6,921 productores vinculados a BOSNICA SA y en otras organizaciones del país.

El modelo propuesto constituye una ruta viable para impulsar el uso del biochar en la región, ya que integra procesos de capacitación, producción certificada, acompañamiento técnico, monitoreo y articulación institucional. Este enfoque favorece la aceptación de la tecnología, incrementa su valor agregado y garantiza una implementación sostenible en el tiempo, contribuyendo a mejorar la productividad agrícola, restaurar suelos degradados y fortalecer los sistemas agroforestales de café en el norte de Nicaragua.

### **Contribución de Autoría CRediT**

En el presente estudio, todos los autores contribuyeron de manera equitativa en todas las etapas de la investigación. La conceptualización del estudio, el diseño de la metodología, la implementación del experimento, la validación de los resultados y el análisis formal fueron desarrollados en conjunto. Asimismo, todos participaron en la investigación, incluyendo la recolección y análisis de datos, la gestión de recursos, y la validación de datos para su posterior reutilización. La redacción del borrador original, así como la revisión y edición del manuscrito, fueron realizadas colaborativamente. En consecuencia, se declara que todos los autores han tenido una participación equitativa en cada aspecto del trabajo.

### **Declaración de intereses contrapuestos**

Los autores declaran que no tienen intereses financieros en conflicto ni relaciones personales conocidas que pudieran haber influido en el trabajo presentado en este artículo.

### **Declaratoria de uso de inteligencia artificial**

Los autores declaran que utilizaron la herramienta de inteligencia artificial (IA) (ChatGPT) para mejorar la redacción y la claridad del contenido del artículo, específicamente en la sección resultados y discusión. El uso de esta herramienta fue necesario para optimizar la estructura del texto, garantizar la coherencia en la argumentación científica y fortalecer la presentación académica del contenido, manteniendo la fidelidad de los datos originales y las interpretaciones realizadas por los autores.

La participación de la herramienta se limitó exclusivamente a la mejora lingüística y organizacional del documento; no generó datos, resultados experimentales ni conclusiones científicas, y todas las decisiones interpretativas fueron tomadas íntegramente por los autores.

### Disponibilidad de datos

Toda la información utilizada en este artículo se encuentra en formato digital y puede ser proporcionada a las personas interesadas mediante una petición formal, entregándose en un archivo digital.

### Agradecimientos y financiamiento

Los autores agradecen al ingeniero Elvin de Jesús Castellón Alvarado, director ejecutivo de la empresa Bosques Nicanadá BOSNICA S.A, por el acompañamiento y apoyo brindado durante el desarrollo de esta investigación. Su colaboración mediante entrevistas, la provisión de información técnica y el acceso a bases de datos sobre la producción y uso del biochar fue fundamental para la realización de este estudio. Los autores declaran que no recibieron financiación externa para la realización de este trabajo.

### Referencias

- Calero Cedeño, D.I. (2021). *Aplicación de carbón activado como medio de sustrato para el desarrollo de plántulas de Schizolobium parahybum (Vell.) S.F. Blake (pachaco) y Samanea saman (Jacq.) Merr (samán) a nivel de vivero en la finca experimental La María de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo*. <https://repositorio.uteq.edu.ec/handle/43000/6526>
- Castro Herrera, J. M., & Estéves Salgado, D. S. (2021). *caracterización espacial de arreglos agroforestales en cuatro paisajes agrícolas del trópico alto, Cundinamarca – Colombia* [Tesis de ingeniería, Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A]. <https://repository.udca.edu.co/server/api/core/bitstreams/43e36910-9520-4635-ba42-568a3c507c23/content>
- Celis Carmona, D. D., Rodríguez Sánchez, Y. F., & Gómez, L. A. (2025). *Diseño conceptual de una planta de pirólisis lenta para la producción de biocarbón derivado de residuos de cultivos y residuos agroindustriales de yuca*. *Revista Sistemas de Producción Agroecológicos*, 16(1). <https://doi.org/10.22579/22484817.1170>
- Cisneros Jayo, G. F., & Nonones Vásquez, N. D. (2024). *Impact of the use of fertilizers on agricultural soils. A systematic review of the scientific literature*. <https://laccei.org/>, 1-10. [https://laccei.org/LACCEI2024-CostaRica/papers/Contribution\\_391\\_final\\_a.pdf](https://laccei.org/LACCEI2024-CostaRica/papers/Contribution_391_final_a.pdf)
- Cruz Loaeza, J, Arvizu-Barrón, E., & Alarcón, A. (2025). *Transferencia de tecnología en el sector agrícola: un análisis bibliométrico*. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 16(7), e3889. Epub 13 de febrero de 2026. <https://doi.org/10.29312/remexca.v16i7.3889>
- Escobar, T. C., & Carlosama, A. R. (2021). *Impacto del biocarbón en el suelo agrícola*. *Avances Investigación En Ingeniería*, 18(2 (Julio-diciembre)). <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.2.7540>



- Forero, S. E, Gambasica, N. V., & Parejo, J. A. (2022). *Biocarbón: Estado del arte, avances y perspectivas en el manejo del suelo*. Revista EIA, 20(39). <https://doi.org/10.24050/reia.v20i39.165>
- Gobierno de Reconciliación Unidad Nacional. (2021, 1 junio). *Avances en el cumplimiento de los ODS, alineados con la Agenda 2030*. Plataforma Urbana y de Ciudades de América Latina y el Caribe. Recuperado 28 de enero de 2026, de <https://plataformaurbana.cepal.org/es/documentos/informe-nacional-voluntario-in- nicaragua-2021>
- La Gaceta. (2019). *Resolución que establece los requisitos y procedimientos, para el otorgamiento de permisos de aprovechamiento (residuos forestales)*. Legislación de Nicaragua. 8 de enero de 2019. No. CODF 135-2018
- Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.). (2024). *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation* (3.<sup>a</sup> ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003297673>
- Liao, W., & Thomas, S. C. (2019). *Biochar Particle Size and Post-Pyrolysis Mechanical Processing Affect Soil pH, Water Retention Capacity, and Plant Performance*. Soil Systems, 3(1). <https://doi.org/10.3390/SOILSYSTEMS3010014>
- Li, C.; Sun, Y.; Zhang, S.; Wang, Y.; Xiang, J.; Hu, S.; Wang, S. y Hu, H. (2021). *Pyrolysis of sesame residue: Evolution of the volatiles and structures of biochar versus temperature*, *Environmental Technology & Innovation*, 24, 101859. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101859>
- López Sawada, S., & Moreno Ospina, M. O. (2020). *Potencialidades agroindustriales y ambientales del biocarbón a partir de la pulpa de café como alternativa sostenible de la economía circular*. Repositorio de la Universidad Tecnológica de Pereira. <https://hdl.handle.net/11059/12116>
- Mankar, A. R., Pandey, A., Modak, A., & Pant, K. K. (2021). Pretreatment of lignocellulosic biomass: A review on recent advances. *Bioresource Technology*, 334(125235). <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2021.125235>
- Martínez Tercero, A. (2020). *Proceso de producción de carbon vegetal BOSNICA-APRODEIN*. Somoto, Nicaragua.
- Martínez Tercero, A. (2022). *Centro de producción APRODEIN/BOSNICA*. Somoto, Nicaragua.
- Montano, D. S. (2023). *Análisis del sistema de innovación en el sector arropecuario de Nicaragua*. Managua, Nicaragua.
- Noteno Bautista, F. A., & Zapata Trujillo, L. S. (2022). *Diseño y construcción de un gasificador para el aprovechamiento energético de biomasa*. Recuperado 28 de enero de 2026, de <https://dspace.epoch.edu.ec:8080/server/api/core/bitstreams/b06551a8-bcd9-4335-8cbd-1d5a646bf6d3/content>
- OECD/FAO (2019), *OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2019-2028*, OECD Publishing, Paris/FAO, Rome, <https://doi.org/10.1787/7b2e8ba3-es>.
- OpenAI. (2025). *como herramienta de apoyo para la redacción y reestructuración del texto, sin sustituir el análisis propio del autor*. Obtenido de <https://chat.openai.com/>

- Pariona, P. J., Ormeño, W. M., & Huanaco, E. H. (2020). *Biochar como tecnología de emisión negativa frente al cambio climático*. South Sustainability, e014. <https://doi.org/10.21142/ss-0102-2020-014>
- Romero, K. (23 de septiembre de 2023). *Innovación y Tecnología: Claves del éxito Agropecuario en Nicaragua*. <https://www.tn8.ni/departamentos/innovacion-y-tecnologia-claves-del-exito-agropecuario-en-nicaragua/>
- Shariat, P., Dehghani, M., Yong, S., Nizami, A., Khoshnevisan, B., Mussatto, S., Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., & Shiung, L., (2020). *Una revisión exhaustiva del biocarbón modificado: producción, características y aplicaciones ambientales*. Revista de producción más limpia Vol. 270. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122462>
- Sánchez Bernal, J.A. (2024). *Modelo de transferencia de tecnología para productores agrícolas a través de redes de innovación*. [Tesis Doctoral, Universidad de Chihuahua]. Repositorio de la universidad de Chihuahua. <http://repositorio.uach.mx/id/eprint/770>
- Sánchez Castillo, M. A., Palomo González, F., Gómez Torres, S. A., Vizcarra Mendoza, M., & De Los Reyes Heredia, J. A. (2025). *Producción sostenible de biochar con aplicaciones agrícolas [Digital]*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2020). *Sistemas Agroforestales, alternativa multifuncional de vida*. En *Gobierno de México*. Recuperado 29 de enero de 2026, de <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/sistemas-agroforestales-alternativa-multifuncional-de-vida?idiom=es>
- Staff, F. (2023, 24 mayo). *Según el Banco Central de Nicaragua, el sector agropecuario representa el 16,5 % del PIB*. Forbes Centroamérica. <https://forbescentroamerica.com/2023/05/24/segun-el-banco-central-de-nicaragua-el-sector-agropecuario-representa-el-165-del-pib>
- Taking Root. (2025, 29 junio). *Diseños forestales y Gestión de parcelas. Módulo 2 [Diapositivas; Digital]*. Dirección Operativa, Vancouver, Columbia Británica, Canadá.
- Zhou, Y., Qin, S., Verma, S., Sar, T., Sarsaiya, S., Ravindran, B., Liu, T., Sindhu, R., Patel, A. K., Binod, P., Varjani, S., Rani Singhnia, R., Zhang, Z., & Awasthi, M. K. (2021). *Production and beneficial impact of biochar for environmental application: A comprehensive review*. *Bioresource Technology*, 337(125451). <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2021.125451>