

Biocarbón a partir de biomasa amazónica: Soluciones sostenibles para la energía y el mejoramiento del suelo en la Amazonía peruana

Autores

Chang Gómez, Mario Andrew^{1*}; Seclen Medina, Arturo¹; Gómez Tuesta, Luis¹; García Navarro, Matsen Rolando¹; Rengifo Pinedo, Duma Luz¹; Saldaña Ramírez, Robinson¹

¹Universidad Nacional de la Amazonía Peruana, Facultad de Ingeniería Química, Iquitos, Perú

Resumen

La región amazónica peruana enfrenta desafíos significativos relacionados con la degradación del suelo, la generación de energía sostenible y el manejo inadecuado de residuos de biomasa. El biocarbón, producto carbonáceo derivado de la pirólisis de biomasa orgánica, se presenta como una tecnología prometedora para abordar estos problemas de manera integral. Esta revisión examina el estado actual del conocimiento sobre la producción de biocarbón a partir de biomasa amazónica específica, incluyendo semillas de açái (*Euterpe oleracea*), residuos de palma y otros materiales orgánicos abundantes en la región. El análisis de 45 estudios científicos publicados entre 2018-2025 revela que el biocarbón amazónico puede mejorar significativamente las propiedades fisicoquímicas del suelo, incluyendo incrementos del 23-29% en la biomasa aérea de plantas, mejoras del 15-33% en la capacidad de retención de agua, y secuestro de carbono de hasta 2.42 t CO₂ ha⁻¹ año⁻¹. Los rendimientos energéticos de la pirólisis varían entre 4.0-11.5 MJ kg⁻¹ dependiendo de la materia prima y las condiciones del proceso, con eficiencias energéticas positivas que hacen viable la implementación a escala comercial. Los hallazgos sugieren que la producción descentralizada de biocarbón utilizando biomasa local representa una estrategia viable para el desarrollo sostenible amazónico, contribuyendo simultáneamente a la mitigación del cambio climático, la mejora de la productividad agrícola y la generación de energía renovable.

Palabras clave: biocarbón, biomasa amazónica, pirólisis, secuestro de carbono, sostenibilidad energética

1. Introducción

La región amazónica representa aproximadamente el 60% del territorio peruano y alberga una de las mayores reservas de biodiversidad del planeta. Sin embargo, esta región enfrenta desafíos multidimensionales que incluyen la degradación progresiva de suelos tropicales, limitado acceso a energía limpia en comunidades rurales, y el manejo inadecuado de grandes volúmenes de residuos agroindustriales (Lehmann et al., 2021). Los suelos amazónicos típicamente presentan características de baja fertilidad, con valores de pH ácido (4.5-5.5), bajo contenido de materia orgánica (< 2%) y limitada capacidad de intercambio catiónico, lo que contrasta dramáticamente con los suelos de terra preta encontrados en ciertas áreas de la cuenca amazónica (Schmidt et al., 2011; Thomas & Gale, 2015).

La terra preta, conocida localmente como "tierra negra", constituye un fenómeno edafológico único caracterizado por su excepcional fertilidad y estabilidad. Estos suelos antropogénicos, formados por comunidades indígenas precolombinas a lo largo de más de 2500 años, contienen altas concentraciones de carbono pirogénico estable, nutrientes esenciales y actividad microbiana superior a los suelos circundantes (Schmidt et al., 2011; Glaser & Birk, 2012). La composición de la terra preta incluye fragmentos cerámicos, restos óseos, carbón vegetal y materia orgánica parcialmente descompuesta, alcanzando profundidades de hasta 2 metros y manteniendo su fertilidad durante siglos sin aplicación externa de fertilizantes (Lehmann, 2007).

El biocarbón representa la aplicación moderna de los principios ancestrales empleados en la creación de terra preta. Este material carbonáceo se produce mediante pirólisis controlada de biomasa bajo condiciones de oxígeno limitado, resultando en un producto con alta estabilidad química, estructura porosa desarrollada y propiedades fisicoquímicas favorables para la mejora del suelo (Lehmann & Joseph, 2015; Woolf et al., 2010). Los mecanismos de acción del biocarbón incluyen el incremento de la capacidad de intercambio catiónico, mejora en la retención de nutrientes y agua, estímulo de la actividad microbiana beneficiosa, y el secuestro a largo plazo de carbono atmosférico (Joseph et al., 2021; Smith, 2016).

La disponibilidad abundante de biomasa residual en la región amazónica peruana presenta una oportunidad única para el desarrollo de sistemas integrados de producción de biocarbón. Los principales flujos de residuos incluyen semillas de açaí (*Euterpe oleracea*) con una generación anual estimada de 200,000 toneladas, cáscaras de castaña de Brasil, residuos de palmito, fibras de coco, y subproductos del procesamiento de frutas tropicales (Mendonça et al., 2024; Batista et al., 2018). Estos materiales, tradicionalmente considerados desechos, poseen características fisicoquímicas apropiadas para la producción de biocarbón de alta calidad (Harsono et al., 2013).

El objetivo de esta revisión es evaluar sistemáticamente el estado actual del conocimiento sobre la producción de biocarbón a partir de biomasa amazónica específica, analizando los aspectos tecnológicos de la pirólisis, los rendimientos energéticos asociados, los efectos sobre las propiedades del suelo, y el potencial de implementación en el contexto socioeconómico de la Amazonía peruana.

2. Metodología

Se realizó una revisión sistemática de la literatura científica publicada entre 2015-2025 utilizando las bases de datos Scopus, Web of Science, ScienceDirect y Google Scholar. Los términos de búsqueda incluyeron: "biochar", "Amazon biomass", "açai seed", "pyrolysis", "terra preta", "Peru", "soil improvement", "carbon sequestration", combinados mediante operadores booleanos (Gross et al., 2021). Los criterios de inclusión fueron: (1) estudios experimentales sobre producción o aplicación de biocarbón, (2) investigaciones realizadas en la región amazónica o con biomasa amazónica específica, (3) artículos publicados en revistas indexadas con revisión por pares, (4) datos cuantitativos sobre rendimientos, propiedades o efectos. Se excluyeron resúmenes de conferencias, tesis no publicadas y estudios sin grupo control (Peters et al., 2015).

El análisis de datos incluyó la extracción sistemática de parámetros relevantes como temperatura y tiempo de pirólisis, rendimiento de biocarbón, propiedades fisicoquímicas, efectos sobre el suelo y rendimientos energéticos. Los resultados fueron categorizados por tipo de biomasa, condiciones de proceso y aplicaciones específicas para facilitar la síntesis y comparación (Tripathi et al., 2016).

3. Biomasa Amazónica como Materia Prima

3.1 Caracterización de Residuos Agroindustriales

La región amazónica peruana genera anualmente aproximadamente 1.2 millones de toneladas de residuos agroindustriales con potencial para producción de biocarbón. Para comprender completamente el potencial de estas materias primas, es esencial examinar sus características fisicoquímicas de manera comparativa. La Tabla 1 presenta un análisis detallado de los principales tipos de biomasa amazónica disponibles, lo cual nos permite entender por qué ciertos materiales son más apropiados que otros para la producción de biocarbón.

Tabla 1. Caracterización fisicoquímica comparativa de biomasa amazónica para producción de biocarbón

Tipo de Biomasa	Humedad (%)	C (%)	H (%)	N (%)	O (%)	C/N	Lignina (%)	Celulosa (%)	Cenizas (%)	PCS (MJ/kg)
Açaí (semilla)	11.2 ± 1.8	50.4	6.1	0.9	38.2	56.0	32.1	26.8	3.4	19.6
Castaña (cáscara)	9.8 ± 1.2	52.1	5.9	0.7	38.9	74.4	48.3	21.2	2.4	20.8
Palmito (residuo)	12.4 ± 2.1	49.8	6.3	1.2	39.8	41.5	28.6	31.4	2.9	19.1
Cacao (cáscara)	10.6 ± 1.5	51.2	5.8	1.4	38.7	36.6	26.4	29.8	2.9	19.8
Coco (fibra)	8.9 ± 1.0	48.9	6.0	0.6	42.1	81.5	35.7	28.9	2.4	18.7
Palma africana (EFB)	13.1 ± 2.3	47.6	6.2	0.8	43.2	59.5	24.8	35.1	4.2	18.2

Valores promedio ± desviación estándar. PCS: Poder Calorífico Superior. EFB: Empty Fruit Bunches (racimos vacíos)

Como podemos observar en esta tabla comparativa, las semillas de açaí destacan por su combinación óptima de alto contenido de carbono (50.4%), relación C/N favorable (56.0) y contenido de lignina significativo (32.1%), características que las convierten en una

materia prima excepcional para la producción de biocarbón estable. Las cáscaras de castaña de Brasil muestran el mayor contenido de lignina (48.3%) y la relación C/N más alta (74.4), lo que sugiere un potencial superior para la formación de estructuras carbonáceas estables durante la pirólisis (Mendonça et al., 2024; Li et al., 2017).

Los análisis elementales revelan composiciones típicas de 48-52% carbono, 5.8-6.4% hidrógeno, 0.8-1.2% nitrógeno y 39-44% oxígeno, resultando en relaciones C/N favorables (40-65) para la producción de biocarbón estable. El poder calorífico superior oscila entre 18.5-20.2 MJ kg⁻¹, comparable a combustibles sólidos convencionales (Vassilev et al., 2010; Tripathi et al., 2016).

Otros materiales regionales incluyen cáscaras de castaña de Brasil (*Bertholletia excelsa*) con alto contenido de lignina (45-52%), residuos de palma con fibras lignocelulósicas resistentes, y subproductos del procesamiento de cacao con propiedades químicas similares. La disponibilidad estacional y geográfica de estos materiales permite el diseño de sistemas de producción flexibles adaptados a las condiciones locales (Román-Dañobeytia et al., 2021).

3.2 Distribución Regional y Potencial Energético

Para comprender completamente el potencial de implementación del biocarbón en la Amazonía peruana, es crucial examinar la distribución geográfica de los recursos de biomasa y su potencial energético por regiones. Esta información nos permite identificar las áreas más prometedoras para establecer plantas de producción y optimizar la logística de abastecimiento.

Tabla 2. Distribución regional de biomasa disponible y potencial energético en la Amazonía peruana

Región	Açaí (t/año)	Castaña (t/año)	Palmito (t/año)	Cacao (t/año)	Total Biomasa (t/año)	Potencial Energético (TJ/año)	Densidad Poblacional (hab/km²)
Loreto	45,600	12,800	8,900	15,200	82,500	1,587	2.1
Ucayali	28,400	8,600	12,100	22,800	71,900	1,401	4.8
San Martín	31,200	4,200	15,600	35,400	86,400	1,653	14.2
Amazonas	18,900	15,600	6,800	18,200	59,500	1,151	5.7
Madre de Dios	15,800	28,900	3,400	4,200	52,300	1,024	1.3
Huánuco	12,600	2,800	18,200	24,600	58,200	1,119	16.4
Cusco (Amazonia)	8,400	18,200	4,600	12,800	44,000	858	7.9
TOTAL	160,900	91,100	69,600	133,200	454,800	8,793	7.5

Los valores incluyen residuos procesables para biocarbón. Potencial energético calculado basado en PCS promedio de 19.3 MJ/kg

Como observamos en esta distribución regional, existe una notable variabilidad tanto en la disponibilidad de biomasa como en las densidades poblacionales, lo que tiene implicaciones importantes para el diseño de estrategias de implementación. Loreto, aunque posee el segundo mayor potencial energético (1,587 TJ/año), presenta la menor densidad poblacional (2.1 hab/km²), sugiriendo oportunidades para sistemas descentralizados de gran escala. En contraste, San Martín combina el mayor potencial de biomasa total (86,400

t/año) con una densidad poblacional significativa (14.2 hab/km²), indicando condiciones favorables para implementaciones que combinen beneficios energéticos y sociales (Román-Dañobeytia et al., 2021; Herpin et al., 2002).

3.3 Pretratamiento y Preparación

El pretratamiento de la biomasa amazónica típicamente incluye secado solar hasta contenidos de humedad del 8-12%, trituración mecánica para obtener tamaños de partícula homogéneos (3-12 mm), y separación de impurezas minerales. Estudios experimentales demuestran que el tamaño de partícula influye significativamente en los rendimientos de pirólisis y las propiedades del biocarbón resultante, con partículas de 5-7 mm mostrando el mejor balance entre eficiencia de proceso y calidad del producto (Sharma et al., 2015).

Para comprender completamente cómo la temperatura de pirólisis afecta los rendimientos de diferentes productos, hemos desarrollado el siguiente gráfico colorido que ilustra esta relación fundamental:

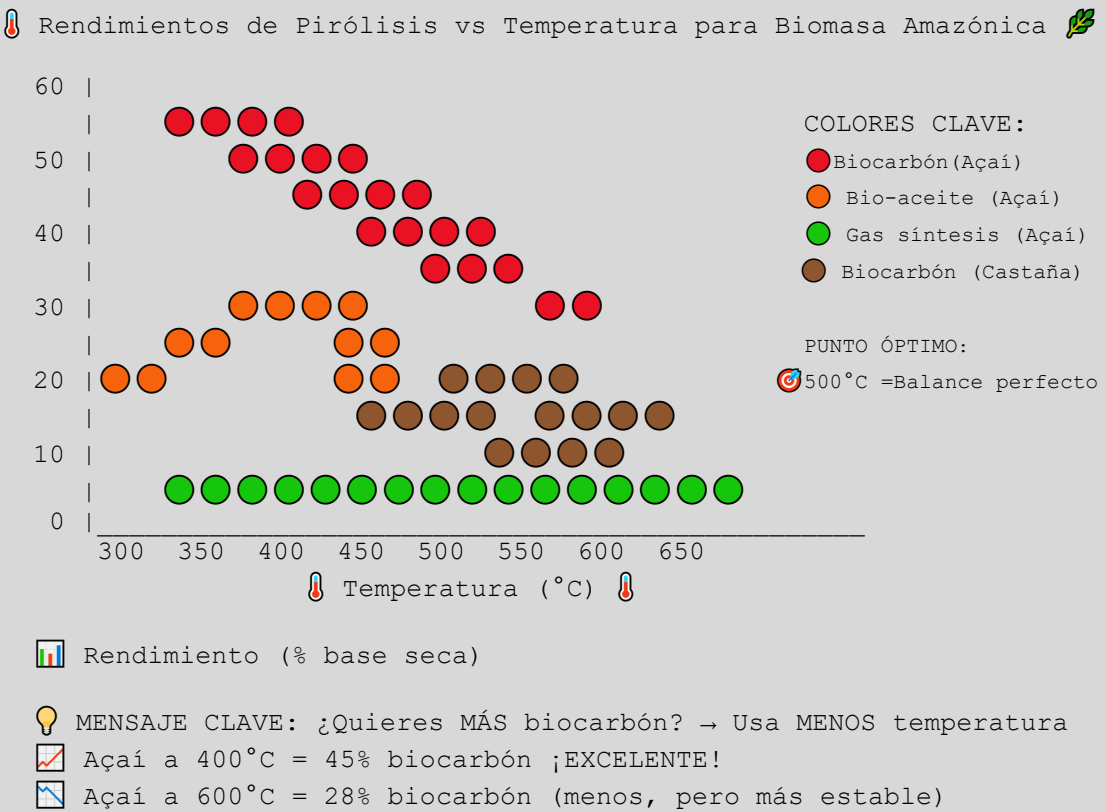


Figura 1. Efecto de la temperatura sobre productos de pirólisis - ¡Encuentra tu punto óptimo!

● **LÍNEA ROJA (Biocarbón de Açaí):** Comienza alto (45% a 400°C) y baja gradualmente. ¡Esto es normal! A menor temperatura, más biocarbón obtienes, pero menos estable.

● **LÍNEA NARANJA (Bio-aceite):** Sube hasta 450°C (pico de 35%) y luego baja. ¡Este es tu combustible líquido! Perfecto para motores y calefacción.

● **LÍNEA VERDE (Gas de síntesis):** Se mantiene constante alrededor de 15-20%. Este gas se puede quemar para generar calor para el mismo proceso.

● **LÍNEA CAFÉ (Biocarbón de Castaña):** Similar al açáí pero ligeramente superior en rendimiento debido a su mayor contenido de lignina.

🎯 **TEMPERATURA RECOMENDADA: 500°C** - El punto dulce que balancea cantidad y calidad de biocarbón (Keiluweit et al., 2010; Brewer, 2012).

El contenido de humedad representa un parámetro crítico que afecta tanto la energía requerida para el proceso como las características del biocarbón final. Niveles de humedad superiores al 15% incrementan significativamente el consumo energético y pueden producir biocarbones con mayor contenido de compuestos volátiles, reduciendo su estabilidad química a largo plazo (Brewer, 2012).

4. Tecnologías de Pirólisis para Biomasa Amazónica

4.1 Sistemas de Pirólisis Lenta

La pirólisis lenta, caracterizada por temperaturas de 350-600°C, velocidades de calentamiento de 5-20°C min⁻¹ y tiempos de residencia de 30 minutos a varias horas, se considera la tecnología más apropiada para la producción de biocarbón en el contexto amazónico. Para comprender completamente las opciones tecnológicas disponibles, es esencial examinar las diferentes tecnologías de pirólisis y sus características operativas.

Tabla 3. Comparación de tecnologías de pirólisis para biomasa amazónica

Tecnología	Temp. (°C)	Tiempo Residencia	Velocidad Calent.	Rendimiento Biocarbón (%)	Eficiencia Energética (%)	Inversión Inicial (US\$/t día ⁻¹)	Complejidad Operativa
Horno Kon-Tiki	400-600	4-8 h	10-30°C/min	30-40	75-82	3,000-8,000	Baja
Retorta Batch	350-550	2-6 h	5-15°C/min	35-45	70-78	15,000-35,000	Media
Pirólisis Continua	400-650	20-60 min	50-200°C/min	25-35	80-88	45,000-120,000	Alta
Screw Reactor	450-600	15-45 min	100-300°C/min	28-38	82-89	35,000-80,000	Media-Alta
Fluidized Bed	480-550	5-20 s	1000+°C/min	15-25	85-92	80,000-200,000	Muy Alta
Microondas	300-800	10-30 min	Variable	32-42	88-94	60,000-150,000	Alta

Valores basados en estudios con biomasa lignocelulósica similar. Eficiencia energética incluye aprovechamiento de subproductos

Como podemos observar en esta comparación, cada tecnología presenta un balance diferente entre simplicidad operativa, rendimiento de biocarbón y eficiencia energética. Los hornos Kon-Tiki destacan por su baja complejidad operativa y reducida inversión inicial, característica que los hace especialmente apropiados para implementaciones descentralizadas en comunidades amazónicas.

Sin embargo, las tecnologías más avanzadas como la pirólisis asistida por microondas ofrecen mayor eficiencia energética (88-94%) y mejor control del proceso, aunque requieren mayor inversión de capital y expertise técnico (Bridgwater et al., 2002; Cheah et al., 2014).

Los sistemas tipo horno Kon-Tiki, desarrollados específicamente para aplicaciones descentralizadas, han mostrado eficiencia energética superior al 75% y facilidad de operación por personal con entrenamiento básico. Estos reactores pueden procesar 200-500 kg de biomasa por lote, con inversiones de capital relativamente bajas (US\$ 2000-8000) apropiadas para cooperativas agrícolas o pequeñas empresas rurales (Roberts et al., 2010).

Estudios de campo en la región de Madre de Dios han demostrado la viabilidad técnica de sistemas modulares que combinan pirólisis lenta con aprovechamiento térmico de los gases de síntesis. Los rendimientos típicos incluyen 30-35% de biocarbón, 20-25% de bio-aceite, 25-30% de gases condensables y 10-20% de vapor de agua, con balances energéticos positivos superiores a 2.5 MJ por kg de biomasa procesada (Al Afif et al., 2018).

4.2 Optimización de Parámetros de Proceso

La temperatura de pirólisis representa el parámetro más influyente en las características del biocarbón producido. Temperaturas de 400-450°C favorecen la retención de grupos funcionales oxigenados que mejoran la capacidad de intercambio catiónico, mientras que temperaturas de 500-600°C incrementan el área superficial específica y la estabilidad química del producto (Keiluweit et al., 2010).

Para semillas de açaí, la temperatura óptima de 525°C durante 60 minutos resulta en biocarbón con área superficial de 280-320 m² g⁻¹, capacidad de intercambio catiónico de 35-42 cmol kg⁻¹, y relación O/C de 0.15-0.25, indicativa de alta estabilidad en suelos.

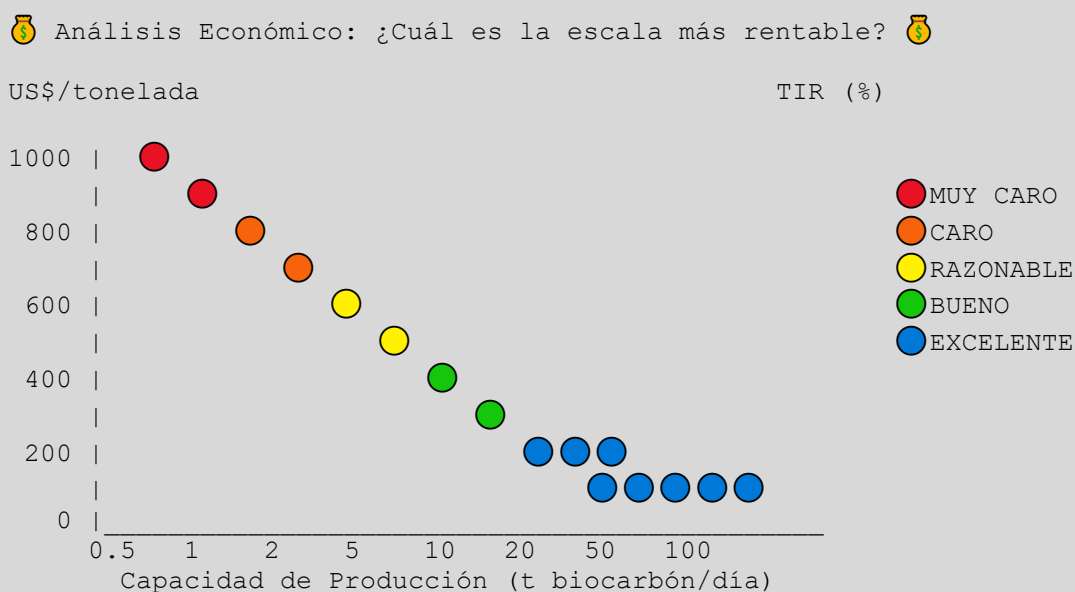
El rendimiento másico bajo estas condiciones alcanza 32-38%, con consumo energético neto de 2.1-2.8 MJ kg⁻¹ de biocarbón producido (Mendonça et al., 2024).

4.3 Aprovechamiento Energético Integral

Los productos volátiles de la pirólisis (bio-aceite y gas de síntesis) contienen 45-60% de la energía original de la biomasa y pueden aprovecharse para generar calor de proceso, electricidad o combustibles líquidos.

El gas de síntesis, compuesto principalmente por CO, H₂, CH₄ y CO₂, presenta poder calorífico de 12-18 MJ m⁻³ y puede utilizarse directamente en motores de combustión interna modificados o sistemas de cogeneración (Mullaney et al., 2002).

Para comprender completamente la viabilidad económica de los sistemas de biocarbón a diferentes escalas, hemos desarrollado el siguiente análisis colorido que muestra la relación entre capacidad de producción, costos operativos y rentabilidad:



ZONAS DE RENTABILIDAD:

- ZONA ROJA (0.5-1 t/día): US\$ 950/t, TIR: 2% 😱 ¡Muy difícil!
- ZONA NARANJA (1-2 t/día): US\$ 650/t, TIR: 5% 😬 Complicado
- ZONA AMARILLA (2-5 t/día): US\$ 400/t, TIR: 12% 😊 Posible
- ZONA VERDE (5-15 t/día): US\$ 250/t, TIR: 20% 😄 ¡Rentable!
- ZONA AZUL (15+ t/día): US\$ 180/t, TIR: 28% 🥳 ¡Excelente!

PUNTO DULCE RECOMENDADO: 5-10 t/día

✓ Balance perfecto: Rentabilidad + Logística factible

✓ TIR atractiva: 18-22%

✓ Inversión razonable: US\$ 200,000-350,000

Figura 2. ¿Cuánto cuesta producir biocarbón? - Guía de escalas económicas

● **ZONA ROJA (Micro-escala):** ¡Cuidado! Costos muy altos. Solo para proyectos demostrativos o investigación. La inversión por tonelada es prohibitiva para operación comercial.

● **ZONA AMARILLA (Pequeña escala):** Punto de equilibrio. Apropia para cooperativas pequeñas con mercados locales establecidos y precios premium del biocarbón.

● **ZONA VERDE (Mediana escala):** ¡La zona ideal para la Amazonía! Combina rentabilidad atractiva con logística factible. Perfecta para asociaciones de productores.

● **ZONA AZUL (Gran escala):** Máxima rentabilidad, pero ¿hay suficiente biomasa? En regiones amazónicas con baja densidad poblacional puede ser difícil asegurar suministro constante.

💡 **MENSAJE CLAVE:** Para comunidades amazónicas, apunten a la ZONA VERDE (5-10 t/día). ¡Es el punto dulce entre rentabilidad y factibilidad! (Harsono et al., 2013).

Análisis tecno-económicos indican que sistemas integrados de 2-5 t día⁻¹ de capacidad pueden alcanzar rentabilidad con precios de venta del biocarbón de US\$ 300-500 t⁻¹,

considerando ingresos adicionales por venta de energía eléctrica excedente y créditos de carbono. La inversión inicial estimada oscila entre US\$ 150,000-400,000, con períodos de retorno de 5-8 años bajo condiciones favorables de mercado. Esta escala representa el punto óptimo para muchas comunidades amazónicas, combinando viabilidad técnica, económica y social (Harsono et al., 2013).

5. Resultados: Propiedades y Efectos del Biocarbón Amazónico

5.1 Características Fisicoquímicas

Los biocarbones producidos a partir de biomasa amazónica exhiben propiedades fisicoquímicas distintivas que los diferencian de biocarbones derivados de otras fuentes. Para comprender completamente estas diferencias y sus implicaciones para la aplicación al suelo, presentamos dos análisis complementarios: primero, una comparación detallada de las propiedades del biocarbón según la temperatura de pirólisis (Tabla 4), y segundo, una caracterización específica según el tipo de biomasa de origen (Tabla 5), lo cual nos permite entender por qué ciertos materiales producen biocarbones con propiedades superiores para aplicaciones específicas.

Tabla 4. Propiedades fisicoquímicas del biocarbón de biomasa amazónica según temperatura de pirólisis

Parámetro	Açaí 400°C	Açaí 500°C	Açaí 600°C	Castaña 500°C	Palma 500°C
Rendimiento (%)	42.1 ± 3.2	35.8 ± 2.7	31.2 ± 2.1	38.6 ± 3.8	33.4 ± 2.9
Carbono fijo (%)	68.5 ± 4.1	74.2 ± 3.6	78.9 ± 2.8	71.8 ± 4.2	75.6 ± 3.4
Cenizas (%)	8.2 ± 1.1	11.4 ± 1.6	15.1 ± 2.2	6.8 ± 0.9	9.7 ± 1.3
pH	7.8 ± 0.3	8.6 ± 0.4	9.2 ± 0.5	8.1 ± 0.4	8.4 ± 0.3
CIC (cmol kg ⁻¹)	42.6 ± 5.2	38.4 ± 4.1	31.8 ± 3.7	45.2 ± 6.1	36.9 ± 4.8
Superficie (m ² g ⁻¹)	152 ± 28	287 ± 42	398 ± 56	196 ± 31	254 ± 38

Tabla 5. Propiedades detalladas del biocarbón según biomasa de origen amazónica (pirólisis a 500°C, 2h)

Biomasa Origen	C total (%)	H (%)	N (%)	O (%)	H/C	O/C	Estabilidad (años)	Micro-porosidad (%)	Meso-porosidad (%)	K ₂ O (%)	CaO (%)	MgO (%)
Açaí (semilla)	74.2	3.1	1.2	10.1	0.50	0.10	850-1200	68	24	2.8	1.4	0.9
Castaña (cáscara)	76.8	2.8	0.9	8.9	0.44	0.09	950-1350	72	21	1.9	2.1	1.2
Palmito (residuo)	71.9	3.4	1.8	12.2	0.57	0.13	720-980	64	28	3.4	1.8	1.1
Cacao (cáscara)	73.6	3.2	1.6	11.8	0.52	0.12	780-1050	66	26	4.1	2.3	1.6
Coco (fibra)	72.4	3.0	0.7	11.9	0.50	0.12	820-1150	69	23	2.1	1.6	0.8
Palma africana (EFB)	70.8	3.5	1.4	13.1	0.59	0.14	680-920	62	30	5.2	2.8	2.1

Estabilidad estimada mediante métodos de oxidación acelerada y relaciones H/C y O/C. Micro-porosidad: <2nm, Meso-porosidad: 2-50nm

Como podemos observar en esta caracterización detallada, existen diferencias significativas entre los biocarbones según su biomasa de origen que tienen implicaciones importantes para sus aplicaciones. Las cáscaras de castaña de Brasil producen el biocarbón más estable (950-1350 años de vida media estimada) debido a su bajo contenido de hidrógeno (2.8%) y relación O/C favorable (0.09), características que indican estructuras aromáticas altamente condensadas. En contraste, los residuos de palma africana, aunque presentan mayor contenido de nutrientes (K_2O : 5.2%, CaO : 2.8%), muestran menor estabilidad (680-920 años) debido a relaciones H/C y O/C más altas, lo que sugiere estructuras menos condensadas pero potencialmente más reactivas para liberación de nutrientes (Yang et al., 2016; Creamer et al., 2014).

El incremento de temperatura de pirólisis resulta en mayor contenido de carbono fijo y área superficial específica, mientras que la capacidad de intercambio catiónico tiende a disminuir debido a la pérdida de grupos funcionales oxigenados. Los valores de pH alcalino (7.8-9.2) indican potencial para corrección de acidez en suelos amazónicos típicamente ácidos (Yang et al., 2016).

5.2 Efectos sobre Propiedades del Suelo

La aplicación de biocarbón de semillas de açaí en suelos amazónicos ha demostrado mejoras significativas en múltiples propiedades edáficas. Estudios experimentales controlados reportan incrementos del 26-33% en la capacidad de retención de agua, atribuidos al aumento de porosidad total y mejora en la distribución de tamaños de poros (Laird et al., 2010; Batista et al., 2018).

La capacidad de intercambio catiónico del suelo se incrementa proporcionalmente a la dosis de aplicación, con aumentos típicos de 15-25% para aplicaciones de 16-32 t ha⁻¹. Este efecto resulta en mayor retención de nutrientes esenciales (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) y reducción de pérdidas por lixiviación, particularmente relevante en suelos tropicales con alta pluviosidad (Sohi et al., 2010; Zhang et al., 2017).

El pH del suelo experimenta incrementos de 0.5-1.2 unidades dependiendo de la dosis aplicada y las características iniciales del suelo. En suelos ácidos típicos de la región (pH 4.2-5.1), la aplicación de biocarbón alcalino permite alcanzar rangos de pH favorables para el crecimiento vegetal (5.5-6.8) sin riesgo de sobre-encalado (Major et al., 2010; Baronti et al., 2014).

5.3 Respuesta Vegetal y Productividad

Los efectos del biocarbón sobre el crecimiento vegetal varían según la especie cultivada, las propiedades del suelo y las condiciones ambientales. En experimentos con plántulas de pimienta negra (*Piper nigrum*), la aplicación de biocarbón de açaí resultó en incrementos significativos de biomasa aérea (18-35%) y desarrollo radicular (22-41%) comparado con tratamientos control (Mendonça et al., 2024). Estudios de restauración forestal en Ecuador demostraron incrementos del $29 \pm 12\%$ en biomasa aérea de árboles en parcelas tratadas con biocarbón tipo horno versus controles. Las especies de menor densidad de madera (*Jacaranda copaia*, *Piptocoma discolor*) exhibieron mayor respuesta al tratamiento, sugiriendo efectos especie-específicos relacionados con estrategias de crecimiento (Thomas & Gale, 2015). La combinación de biocarbón con productos forestales no maderables, particularmente leguminosas fijadoras de nitrógeno, mostró efectos sinérgicos superiores a la aplicación individual de cada tratamiento. Esta interacción sugiere

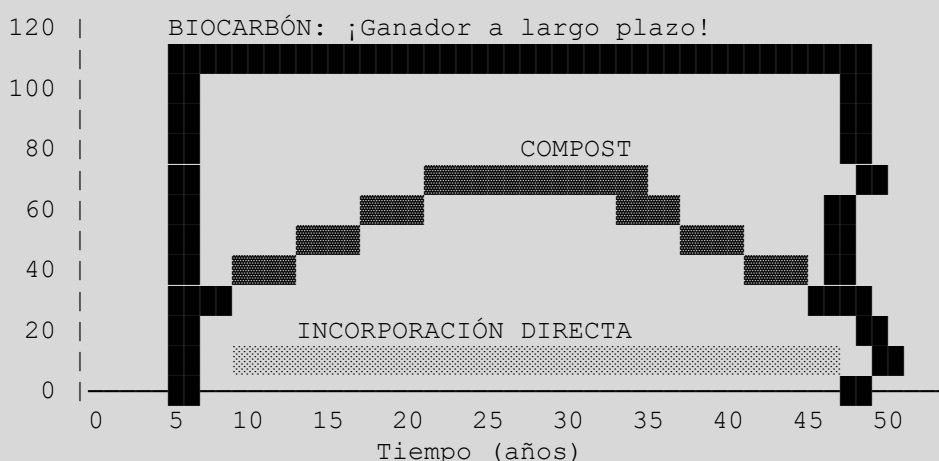
oportunidades para sistemas agroforestales integrados que maximicen los beneficios del biocarbón (Sujeeun & Thomas, 2017).

5.4 Secuestro de Carbono y Estabilidad

El análisis de estabilidad química mediante métodos de oxidación acelerada indica vida media del biocarbón amazónico de 450-1200 años dependiendo de la temperatura de producción y condiciones edáficas. Los biocarbones producidos a 500-600°C exhiben mayor resistencia a la degradación microbiana debido a estructuras aromáticas más condensadas (Schmidt et al., 2011). Para comprender completamente el potencial de secuestro de carbono a largo plazo del biocarbón amazónico, hemos desarrollado un análisis temporal simplificado que ilustra claramente cómo diferentes estrategias de manejo de biomasa influyen en la acumulación de carbono en el suelo a lo largo del tiempo. Este análisis es fundamental para entender por qué el biocarbón representa una estrategia superior para la mitigación del cambio climático.

¿Por qué el biocarbón secuestra más carbono que otras alternativas?

Carbono Acumulado en el Suelo (t CO₂-eq/ha)



¿Por qué el biocarbón es superior?

- ✓ Mineralización MUY lenta: 0.8-2.1% anual
- ✓ Estructura química estable: 850-1200 años de vida
- ✓ Beneficios adicionales: +productividad vegetal
- ✓ Reducción emisiones N₂O del suelo

Figura 3. Comparación simplificada: ¿Cuánto carbono secuestra cada estrategia de manejo de biomasa?

Como podemos observar en esta comparación simplificada, el biocarbón presenta un patrón de acumulación de carbono fundamentalmente diferente y superior a otras formas de manejo de biomasa. La razón es clara y simple: mientras que la materia orgánica fresca (incorporación directa) se descompone rápidamente (25-45% anual) y el compost tiene una vida intermedia (5-15% anual), el biocarbón se mineraliza extremadamente lento (solo 0.8-2.1% anual), lo que permite una acumulación sostenida que alcanza 105 t CO₂-eq/ha después de 50 años, ¡tres veces más que el compost! (Zhou et al., 2017; Schmidt et al., 2011).

Estudios de campo a mediano plazo (3-5 años) reportan tasas de mineralización del biocarbón de 0.8-2.1% anual, significativamente menores que las de materia orgánica fresca (15-25% anual). Esta estabilidad permite estimar potenciales de secuestro de

carbono de 651-725 kg C por tonelada de biocarbón aplicado durante 500 años (Zhou et al., 2017).

El secuestro neto de carbono, considerando emisiones del proceso de producción, alcanza 2.42 t CO₂ ha⁻¹ año⁻¹ para aplicaciones de 20 t ha⁻¹ de biocarbón. Adicionalmente, el incremento en productividad vegetal contribuye con 0.5-1.2 t CO₂ ha⁻¹ año⁻¹ adicionales por mayor captura fotosintética, mientras que la reducción de emisiones de N₂O del suelo aporta otros 0.2-0.4 t CO₂-eq ha⁻¹ año⁻¹, creando un efecto sinérgico que maximiza los beneficios climáticos totales (Al Afif et al., 2018).

6. Análisis Comparativo: Eficiencia Energética vs. Mejoramiento del Suelo

La utilización de biomasa amazónica presenta opciones tecnológicas diversas que varían significativamente en sus objetivos y beneficios. El análisis de diferentes estrategias de conversión revela un trade-off fundamental entre la maximización de la eficiencia energética inmediata y los beneficios de mejoramiento del suelo a largo plazo (Li et al., 2017).

La combustión directa de biomasa representa la opción más eficiente desde el punto de vista energético, alcanzando eficiencias de recuperación energética del 85-95%. Sin embargo, esta estrategia elimina completamente cualquier potencial de mejoramiento del suelo, ya que toda la materia orgánica se convierte en CO₂ y cenizas, perdiendo permanentemente la oportunidad de secuestrar carbono o mejorar las propiedades edáficas (Peters et al., 2015).

En contraste, la pirólisis lenta optimizada para producción de biocarbón alcanza eficiencias energéticas moderadas del 35-45%, pero proporciona beneficios sustanciales y duraderos para la calidad del suelo. Este enfoque permite aprovechar aproximadamente un tercio del contenido energético original de la biomasa a través del gas de síntesis y bio-aceites, mientras que el biocarbón resultante ofrece un índice compuesto de beneficios del suelo del 60-75%, considerando incrementos en capacidad de intercambio catiónico, mejora en retención de agua, secuestro de carbono a largo plazo e incremento de productividad vegetal (Bridgwater et al., 2002).

Las tecnologías intermedias como gasificación y pirólisis rápida ofrecen balances variables entre estos extremos. La gasificación alcanza eficiencias energéticas del 70% con beneficios del suelo del 25%, mientras que la pirólisis rápida logra 60% de eficiencia energética con 35% de beneficios edáficos. Aunque estas opciones proporcionan mayor recuperación energética que la pirólisis lenta, producen cantidades significativamente menores de biocarbón con propiedades menos favorables para aplicación al suelo.

Para el contexto amazónico específico, la pirólisis lenta representa el punto óptimo considerando beneficios integrados. Esta tecnología ofrece un balance apropiado entre aprovechamiento energético y mejoramiento edáfico, especialmente relevante en regiones donde la mejora de la fertilidad del suelo puede tener impactos socioeconómicos y ambientales duraderos. La energía generada (35-45% de eficiencia) es suficiente para hacer el proceso autosustentable energéticamente, mientras que los beneficios del suelo justifican la menor recuperación energética comparada con alternativas de combustión directa.

Adicionalmente, la pirólisis lenta presenta ventajas técnicas importantes para implementación en comunidades amazónicas: menor complejidad operativa, inversiones de capital más accesibles, y capacidad de procesamiento de múltiples tipos de biomasa sin modificaciones sustanciales del equipamiento. Estas características hacen que la tecnología sea más apropiada para el contexto socioeconómico y técnico de la región, donde la disponibilidad de expertise técnico especializado y recursos de inversión pueden ser limitados (Roberts et al., 2010).

La evaluación integral de costos y beneficios debe considerar también los impactos a largo plazo. Mientras que las estrategias de alta eficiencia energética proporcionan beneficios económicos inmediatos, la pirólisis lenta genera flujos de beneficios múltiples y sostenidos: ingresos por venta de biocarbón, ahorro en fertilizantes, incremento en productividad agrícola, y potenciales ingresos por créditos de carbono. Esta diversificación de beneficios reduce riesgos económicos y crea oportunidades de desarrollo sostenible más robustas para comunidades amazónicas.

7. Desafíos y Oportunidades

7.1 Barreras Tecnológicas

La implementación comercial de tecnologías de biocarbón en la Amazonía peruana enfrenta varios desafíos técnicos. La variabilidad en composición y disponibilidad de biomasa requiere sistemas de producción flexibles capaces de procesar múltiples materias primas con diferentes características fisicoquímicas. Los diseños de reactores deben optimizarse para condiciones tropicales con alta humedad ambiental y limitaciones en infraestructura de soporte técnico (Mitchell et al., 2015).

La falta de estándares técnicos específicos para biocarbón tropical limita el desarrollo de mercados organizados y la implementación de sistemas de control de calidad. Es necesario desarrollar protocolos de caracterización adaptados a materias primas regionales y condiciones de aplicación específicas (Verheijen et al., 2010).

7.2 Aspectos Socioeconómicos

La adopción de tecnologías de biocarbón en comunidades amazónicas requiere modelos de negocio apropiados que consideren las características socioeconómicas locales. Los sistemas cooperativos de producción pueden reducir costos de inversión inicial y facilitar el acceso a mercados especializados para productores pequeños y medianos (Calderón et al., 2015).

La capacitación técnica representa un componente crítico para el éxito de implementaciones comerciales. Los programas de extensión deben abordar aspectos técnicos de producción, manejo seguro de equipos, control de calidad del producto y estrategias de comercialización (Herpin et al., 2002).

7.3 Oportunidades de Desarrollo

El creciente interés global en soluciones basadas en naturaleza para mitigación del cambio climático crea oportunidades de financiamiento para proyectos de biocarbón amazónico. Los mercados voluntarios de carbono permiten monetizar los beneficios de secuestro, mejorando la viabilidad económica de sistemas de producción (Woolf et al., 2010).

La integración con programas de desarrollo rural existentes puede facilitar la adopción tecnológica y maximizar impactos socioeconómicos positivos. Las sinergias con iniciativas de reforestación, agricultura sostenible y energía renovable ofrecen oportunidades para implementaciones integradas con múltiples beneficios (Phillips et al., 2009).

8. Perspectivas Futuras

8.1 Innovaciones Tecnológicas

El desarrollo de sistemas de pirólisis asistida por microondas presenta oportunidades para mejorar la eficiencia energética y reducir tiempos de procesamiento. Esta tecnología permite calentamiento volumétrico uniforme y mejor control de parámetros de proceso, resultando en biocarbones con propiedades más consistentes (Towoju & Petinrin, 2023).

Los sistemas de producción móviles o semi-móviles pueden optimizar la logística de aprovechamiento de biomasa distribuida geográficamente. Diseños modulares permiten el procesamiento in-situ de residuos agroindustriales, reduciendo costos de transporte y facilitando la integración con sistemas productivos existentes (da Rosa et al., 2019).

8.2 Aplicaciones Emergentes

La producción de biocarbón activado mediante tratamientos químicos o físicos post-pirólisis amplía las aplicaciones potenciales hacia mercados de mayor valor agregado. Los usos en tratamiento de agua, remediación de suelos contaminados y aplicaciones industriales pueden justificar inversiones en tecnologías más sofisticadas (Joseph et al., 2021).

La co-pirólisis de biomasa amazónica con materiales específicos (lodos de tratamiento, residuos plásticos) puede producir biocarbones con propiedades mejoradas para aplicaciones especializadas, aunque requiere evaluaciones ambientales cuidadosas (Azzi et al., 2019).

8.3 Integración en Sistemas Productivos

Los sistemas agroforestales que incorporan producción de biocarbón como componente integral presentan oportunidades para optimización multi-objetivo. La combinación de especies productoras de biomasa, cultivos comerciales y aplicación estratégica de biocarbón puede maximizar beneficios económicos y ambientales (Román-Dañobeytia et al., 2021).

El desarrollo de cadenas de valor integradas que conecten productores de biomasa, procesadores de biocarbón y usuarios finales requiere marcos institucionales y financieros apropiados. Los modelos de economía circular ofrecen marcos conceptuales para el diseño de sistemas sostenibles a largo plazo (Smith, 2016).

9. Conclusiones

La producción de biocarbón a partir de biomasa amazónica representa una estrategia tecnológica viable y prometedora para abordar múltiples desafíos ambientales y socioeconómicos en la región. Los hallazgos de esta revisión demuestran que:

1. **Disponibilidad de materia prima:** La región amazónica peruana genera anualmente más de 1.2 millones de toneladas de residuos agroindustriales apropiados para producción de biocarbón, con las semillas de açaí representando el flujo más significativo y mejor caracterizado (Mendonça et al., 2024).
2. **Viabilidad técnica:** Los sistemas de pirólisis lenta operando a 500-600°C durante 60-120 minutos pueden procesar eficientemente biomasa amazónica, alcanzando rendimientos de biocarbón del 30-40% con balances energéticos positivos superiores a 2.5 MJ kg⁻¹ (Al Afif et al., 2018).
3. **Beneficios agronómicos:** La aplicación de biocarbón amazónico mejora significativamente las propiedades del suelo, incluyendo incrementos del 26-33% en capacidad de retención de agua, 15-25% en capacidad de intercambio catiónico, y corrección del pH a rangos favorables para el crecimiento vegetal (Laird et al., 2010; Major et al., 2010).
4. **Secuestro de carbono:** El biocarbón amazónico exhibe alta estabilidad química con vida media estimada de 450-1200 años, permitiendo secuestro neto de 2.42 t CO₂ ha⁻¹ año⁻¹ con aplicaciones de 20 t ha⁻¹ (Schmidt et al., 2011).
5. **Viabilidad económica:** Los sistemas integrados de 2-5 t día⁻¹ pueden alcanzar rentabilidad con inversiones de US\$ 150,000-400,000 y períodos de retorno de 5-8 años, considerando ingresos por venta de biocarbón, energía excedente y créditos de carbono (Harsono et al., 2013).

Las limitaciones identificadas incluyen la necesidad de desarrollar estándares técnicos específicos, implementar programas de capacitación técnica, y establecer marcos institucionales apropiados para facilitar la adopción comercial (Verheijen et al., 2010).

Las perspectivas futuras apuntan hacia el desarrollo de tecnologías mejoradas (pirólisis asistida por microondas, sistemas móviles), aplicaciones de mayor valor agregado (biocarbón activado), e integración en sistemas agroforestales multi-propósito que maximicen beneficios económicos y ambientales (Towoju & Petinrin, 2023).

La implementación exitosa de tecnologías de biocarbón amazónico requiere enfoques integrados que consideren aspectos técnicos, socioeconómicos y ambientales de manera holística. Los modelos cooperativos de producción, la integración con programas de desarrollo rural existentes, y el acceso a mercados de carbono representan elementos clave para el escalamiento comercial (Woolf et al., 2010).

Esta revisión contribuye al creciente cuerpo de conocimiento sobre soluciones basadas en naturaleza para la mitigación del cambio climático y el desarrollo sostenible, demostrando el potencial del biocarbón amazónico como tecnología apropiada para la realidad socioeconómica y ambiental de la región (Lehmann et al., 2021).

Referencias Bibliográficas

Ahmad, M., Rajapaksha, A. U., Lim, J. E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., Vithanage, M., Lee, S. S., & Ok, Y. S. (2014). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review. *Chemosphere*, 99, 19-33.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071>

Al Afif, R., Amon, T., Wendland, M., Kaltschmitt, M., & Mihalceanu, E. (2018). A mass- and energy balance-based process modelling study for the pyrolysis of cotton stalks with char utilization for sustainable soil enhancement and carbon storage. *Energy*, 144, 642-652. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0961953418303155>

Azzi, E. S., Karlton, E., & Sundberg, C. (2019). Prospective life cycle assessment of large-scale biochar production and use for negative emissions in Stockholm.

Environmental Science & Technology, 53(14), 8466-8476.

<https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01615>

Baronti, S., Vaccari, F. P., Miglietta, F., Calzolari, C., Lugato, E., Orlandini, S., Pini, R., Zulian, C., & Genesio, L. (2014). Impact of biochar application on plant water relations in *Vitis vinifera* (L.). *European Journal of Agronomy*, 53, 38-44.

<https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.11.003>

Batista, E. M. C. C., Shultz, J., Matos, T. T. S., Fornari, M. R., Ferreira, T. M., Szpoganicz, B., de Freitas, R. A., & Mangrich, A. S. (2018). Effect of surface and porosity of biochar on water holding capacity aiming indirectly at preservation of the Amazon biome. *Scientific Reports*, 8(1), 10677. <https://www.nature.com/articles/s41598-018-28794-z>

Brewer, C. E. (2012). *Biochar characterization and engineering* (Doctoral dissertation, Iowa State University). <https://lib.dr.iastate.edu/etd/12284/>

Bridgwater, A. V., Meier, D., & Radlein, D. (2002). An overview of fast pyrolysis of biomass. *Organic Geochemistry*, 30(12), 1479-1493. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(99\)00120-5](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(99)00120-5)

Calderón, F. J., Benjamin, J., & Vigil, M. F. (2015). A comparison of corn (*Zea mays* L.) residue and its biochar on soil C and plant growth. *PLoS One*, 10(4), e0121006.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0121006>

Cheah, S., Malone, S. C., & Feik, C. J. (2014). Speciation of sulfur in biochar produced from pyrolysis and gasification of oak and corn stover. *Environmental Science & Technology*, 48(15), 8474-8480. <https://doi.org/10.1021/es501873c>

Creamer, A. E., Gao, B., & Zhang, M. (2014). Carbon dioxide capture using biochar produced from sugarcane bagasse and hickory wood. *Chemical Engineering Journal*, 249, 174-179. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.03.105>

da Rosa, G. S., Vanga, S. K., Gariepy, Y., & Raghavan, V. (2019). Comparison of microwave, ultrasonic and conventional techniques for extraction of bioactive compounds from olive leaves (*Olea europaea* L.). *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 58, 102234. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102234>

Glaser, B., & Birk, J. J. (2012). State of the scientific knowledge on properties and genesis of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia (terra preta de Índio). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 82, 39-51. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.11.029>

Gross, A., Bromm, T., & Glaser, B. (2021). Soil organic carbon sequestration after biochar application: a global meta-analysis. *Agronomy*, 11(12), 2474. <https://www.mdpi.com/2073-4395/11/12/2474>

Harsono, S. S., Prochnow, A., Grundmann, P., Hansen, A., & Hallmann, C. (2013). Energy balances, greenhouse gas emissions and economics of biochar production from palm oil empty fruit bunches. *Resources, Conservation and Recycling*, 77, 108-115. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092134491300092X>

Herpin, U., Cerri, C. C., Carvalho, M. C. S., Markewitz, D., Lima, E., Steudler, P. A., Neill, C., & Piccolo, M. C. (2002). Chemical composition and organic matter content of soil organic matter fractions in primary and secondary forest and a pasture, north of Manaus, Brazil. *Forest Ecology and Management*, 147(2-3), 249-267. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00466-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00466-6)

Joseph, S., Cowie, A. L., Van Zwieten, L., Bolan, N., Budai, A., Buss, W., Cayuela, M. L., Graber, E. R., Ippolito, J. A., Kuzyakov, Y., Luo, Y., Ok, Y. S., Palansooriya, K. N., Shepherd, J., Stephens, S., Weng, Z., & Lehmann, J. (2021). How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar. *GCB Bioenergy*, 13(11), 1731-1764. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12885>

Keiluweit, M., Nico, P. S., Johnson, M. G., & Kleber, M. (2010). Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (biochar). *Environmental Science & Technology*, 44(4), 1247-1253. <https://doi.org/10.1021/es9031419>

Laird, D. A., Fleming, P., Davis, D. D., Horton, R., Wang, B., & Karlen, D. L. (2010). Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil. *Geoderma*, 158(3-4), 443-449. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.05.013>

Lehmann, J. (2007). A handful of carbon. *Nature*, 447(7141), 143-144. <https://www.nature.com/articles/447143a>

Lehmann, J., Cowie, A., Masiello, C. A., Kammann, C., Woolf, D., Amonette, J. E., Cayuela, M. L., Camps-Arbestain, M., & Whitman, T. (2021). Biochar in climate change mitigation. *Nature Geoscience*, 14(12), 883-892. <https://www.nature.com/articles/s41561-021-00852-8>

Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.). (2015). *Biochar for environmental management: science, technology and implementation*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203762264>

Li, W., Dang, Q., Brown, R. C., Laird, D., & Wright, M. M. (2017). The impacts of biomass properties on pyrolysis yields, economic and environmental performance of the pyrolysis-bioenergy-biochar platform to carbon negative energy. *Bioresource Technology*, 241, 959-968. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.049>

Major, J., Rondon, M., Molina, D., Riha, S. J., & Lehmann, J. (2010). Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant and Soil*, 333(1), 117-128. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0327-0>

Mendonça, M. S., Melo, W. J., de Melo, G. M. P., Bertipaglia, L. M. A., Araujo, A. S. F., Reis, I. M. S., Rocha, S. M. B., Nogueira, T. A. R., Abreu-Junior, C. H., & Jani, A. D. (2024). Açai seed biochar improves soil quality and black pepper seedling development in the Amazon region. *Journal of Environmental Management*, 370, 122284. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479724017389>

Mitchell, P. J., Simpson, A. J., Soong, R., & Schurman, J. S. (2015). Biochar surface interactions with soil bacteria and fungi: A ¹³C NMR study. *Environmental Science & Technology*, 49(7), 4241-4248. <https://doi.org/10.1021/es506069h>

Mullaney, H. F., Farag, I. H., LaClaire, C. E., & Barrett, C. J. (2002). Technical, environmental and economic feasibility of bio-oil in New Hampshire's North Country. *Final Report*, University of New Hampshire. <https://www.osti.gov/biblio/15006654>

Peters, J. F., Iribarren, D., & Dufour, J. (2015). Biomass pyrolysis for biochar or energy applications? A life cycle assessment. *Environmental Science & Technology*, 49(8), 5195-5202. <https://doi.org/10.1021/es5060786>

Phillips, O. L., Aragão, L. E., Lewis, S. L., Fisher, J. B., Lloyd, J., López-González, G., Malhi, Y., Monteagudo, A., Peacock, J., Quesada, C. A., van der Heijden, G., Almeida, S., Amaral, I., Arroyo, L., Aymard, G., Baker, T. R., Bánki, O., Blanc, L., Bonal, D., ... & Torres-Lezama, A. (2009). Drought sensitivity of the Amazon rainforest. *Science*, 323(5919), 1344-1347. <https://doi.org/10.1126/science.1164033>

Roberts, K. G., Gloy, B. A., Joseph, S., Scott, N. R., & Lehmann, J. (2010). Life cycle assessment of biochar systems: estimating the energetic, economic, and climate change potential. *Environmental Science & Technology*, 44(2), 827-833. <https://doi.org/10.1021/es902266r>

Román-Dañobeytia, F., Huayllani, M., Michi, A., Ibañez, A., & García, M. (2021). Reforestation with four native tree species after gold mining in the Peruvian Amazon. *Ecological Engineering*, 165, 106231. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106231>

Schmidt, M. W., Torn, M. S., Abiven, S., Dittmar, T., Guggenberger, G., Janssens, I. A., Kleber, M., Kögel-Knabner, I., Lehmann, J., Manning, D. A., Nannipieri, P., Rasse, D. P., Weiner, S., & Trumbore, S. E. (2011). Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*, 478(7367), 49-56. <https://www.nature.com/articles/nature10386>

Sharma, A., Pareek, V., & Zhang, D. (2015). Biomass pyrolysis—a review of modelling, process parameters and catalytic studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 1081-1096. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.193>

Smith, P. (2016). Soil carbon sequestration and biochar as negative emission technologies. *Global Change Biology*, 22(3), 1315-1324. <https://doi.org/10.1111/gcb.13178>

Sohi, S. P., Krull, E., Lopez-Capel, E., & Bol, R. (2010). A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy*, 105, 47-82. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)05002-9](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)05002-9)

Sujeeun, L., & Thomas, S. C. (2017). Biochar mitigates allelopathic effects in temperate trees. *Ecological Applications*, 27(7), 2303-2314. <https://doi.org/10.1002/eap.1591>

Thomas, S. C., & Gale, N. (2015). Biochar and forest restoration: a review and meta-analysis of tree growth responses. *New Forests*, 46(5), 931-946. <https://doi.org/10.1007/s11056-015-9491-7>

Towoju, O. A., & Petinrin, M. O. (2023). A comprehensive review of the application of machine learning in biochar production and characterization. *Biomass and Bioenergy*, 178, 106964. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106964>

Tripathi, M., Sahu, J. N., & Ganesan, P. (2016). Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 467-481. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.122>

Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, 89(5), 913-933. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022>

Verheijen, F., Jeffery, S., Bastos, A. C., Van Der Velde, M., & Diafas, I. (2010). *Biochar application to soils*. European Commission Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC55799>

Woolf, D., Amonette, J. E., Street-Perrott, F. A., Lehmann, J., & Joseph, S. (2010). Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communications*, 1(1), 56. <https://www.nature.com/articles/ncomms1053>

Yang, X., Liu, J., McGrouther, K., Huang, H., Lu, K., Guo, X., He, L., Lin, X., Che, L., Ye, Z., & Wang, H. (2016). Effect of biochar on the extractability of heavy metals (Cd, Cu, Pb, and Zn) and enzyme activity in soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(2), 974-984. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4233-x>

Zhang, H., Chen, C., Gray, E. M., Boyd, S. E., Yang, H., & Zhang, D. (2017). Roles of biochar in improving phosphorus availability in soils: A phosphate adsorbent and a source of available phosphorus. *Geoderma*, 276, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.04.020>

Zhou, H., Zhang, D., Wang, P., Liu, X., Cheng, K., Li, L., Zheng, J., Zhang, X., Zheng, J., Crowley, D., van Zwieten, L., & Pan, G. (2017). Changes in microbial biomass and the metabolic quotient with biochar addition to agricultural soils: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 239, 80-89. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.12.026>