

Artículo original

Del residuo agroindustrial al biochar diseñado: composición, estructura molecular y aplicaciones de alto valor agregado

From agro-industrial waste to engineered biochar: composition, molecular structure, and high-value-added applications

Farid Chejne¹, Valentina Sierra-Jiménez², Robert Macias³, Javier Ordóñez⁴, Juan C. Maya⁵ y Carlos A. Gómez⁶

¹ Abisure Network, TAYEA Group, Universidad Nacional de Colombia; Academia de Física, Ciencias Exactas y Afines de Colombia, Bogotá, Colombia

² Department of Biological Systems Engineering, Washington State University, Pullman, WA, Estados Unidos

³ Department of Wood Science and Engineering, Oregon State University, Corvallis, OR, Estados Unidos

⁴ Universidad de Groninga, Groninga, Países Bajos; ITER Technologies, London, Ontario, Canadá

⁵ Grupo de Investigación TAYEA, Departamento de Procesos y Energía, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín, Medellín Colombia

⁶ SUME ENERGYC S.A.S., Medellín, Colombia

Resumen

En este artículo se examina cómo la composición de la biomasa agroindustrial y las condiciones de pirólisis determinan la estructura molecular y el desempeño funcional del biochar desde una perspectiva de ingeniería de materiales. En el contexto colombiano y latinoamericano, la valorización descentralizada de residuos agrícolas y forestales (cascarilla de arroz, bagazo de caña, podas urbanas, residuos de palma y pulpa de café) representa una vía estratégica para la transición energética y la economía circular, en línea con los objetivos de desarrollo sostenible y el enfoque *One Health*. Se describen los procesos termoquímicos (torrefacción, pirólisis lenta y rápida y gasificación) y las rutas biológicas complementarias y se analizan los mecanismos que rigen la formación del biochar: despolimerización, fragmentación, condensación aromática y desarrollo de defectos estructurales. A partir de estos fundamentos, se construye una matriz que vincula las principales aplicaciones del biochar —secuestro de carbono, mejoramiento de suelos, catálisis heterogénea, adsorción de contaminantes y almacenamiento electroquímico de energía— con las características estructurales y las condiciones de síntesis que las favorecen. Se concluye que el biochar debe entenderse como un material diseñado, y no como un subproducto indiferenciado de la pirólisis, y se propone la ingeniería de biochar como marco para orientar su desarrollo hacia aplicaciones de alto valor agregado.

Palabras clave: Biomasa; Biocarbón; Procesos termoquímicos; Aplicaciones del biocarbón.

Abstract

This article examines how the composition of agro-industrial biomass and pyrolysis conditions determine the molecular structure and functional performance of biochar from a materials engineering perspective. In the Colombian and Latin American context, the decentralized valorization of agricultural and forestry residues—including rice husks, sugarcane bagasse, urban pruning residues, oil palm residues, and coffee pulp—represents a strategic pathway toward energy transition and circular economy, in alignment with the Sustainable Development Goals and the One Health approach. We describe the thermochemical processes (torrefaction, slow and fast pyrolysis, and gasification), together with complementary biological pathways, and we analyze the mechanisms governing biochar formation: depolymerization, fragmentation, aromatic condensation, and the development of structural defects. Based on these fundamentals, we present a framework linking the main biochar applications—carbon sequestration, soil improvement, heterogeneous catalysis, pollutant adsorption, and electrochemical energy storage—to the structural characteristics and

Citación: Chejne, et al. Del residuo agroindustrial al biochar diseñado: composición, estructura molecular y aplicaciones de alto valor agregado. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 2026 Oct 14. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.4177>

Editor: Sonia Moreno Guáqueta

***Correspondencia:**

Farid Chejne; fchejne@unal.edu.co

Recibido: 28 de julio de 2026

Aceptado: 28 de septiembre de 2026

Publicado en línea: 14 de octubre de 2026



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

synthesis conditions that promote their performance. We conclude that biochar should be understood as an engineered material rather than an undifferentiated by-product of pyrolysis and propose biochar engineering as a guiding framework for its development toward high-value-added applications.

Keywords: Biomass; Biochar; Thermochemical processes; Biochar applications.

Introducción

Según la ONU, el desarrollo sostenible señala cómo debemos vivir hoy si queremos un futuro mejor, ocupándose de las necesidades presentes sin comprometer las oportunidades de las generaciones futuras de cumplir con las suyas. La supervivencia de nuestras sociedades y de nuestro planeta común pasa por un mundo más sostenible (FAO *et al.*, 2022; ONU, 2023). En este sentido, debe considerarse que para el 2030 alrededor de 660 millones de personas seguirán sin acceso a la energía eléctrica y casi 2.000 millones todavía dependerán de combustibles y tecnologías contaminantes para satisfacer su demanda energética, lo que conduce a la emisión de gases de efecto invernadero. En el caso colombiano, se emiten anualmente alrededor de 237 millones de toneladas de dióxido de carbono (CO₂), que, según el IDEAM (2019) y la investigación de Ricardo Delgado, Thomas Wild, Ricardo Arguello y León Clarke, equivalen al 0,47 % de las toneladas de CO₂ emitidas en el mundo (Lefrançois *et al.*, 2023; ONU, 2023).

El mundo depende de energía segura y asequible para los sectores médico, educativo, agropecuario, industrial, de las comunicaciones y la tecnología, y para la infraestructura. Los servicios energéticos son fundamentales para prevenir enfermedades y luchar contra las pandemias, lo que sería imposible sin el abastecimiento de energía a las instalaciones sanitarias, el suministro de agua potable para la higiene esencial y la provisión de las comunicaciones y los servicios informáticos entre las personas en diferentes lugares del mundo.

Para evitar el ciclo que se presenta en la **Figura 1**, es crucial enfocarse en el desarrollo de energías limpias y tecnologías de captura y secuestro de carbono (CSC). El uso de combustibles fósiles sin la captura de CO₂ genera gases de efecto invernadero que pueden intensificar la crudeza del fenómeno de El Niño, lo cual promueve una mayor demanda de energía que difícilmente puede ser suministrada por hidroeléctricas, por lo que se recurre a centrales térmicas que emplean recursos fósiles, con lo que se genera más CO₂. Este fenómeno, sumado a la deforestación indiscriminada, provoca la proliferación de virus y el deterioro del equilibrio de los ecosistemas.

Además de la crisis energética, la gestión de residuos constituye el segundo gran reto de sostenibilidad. El aumento de la población trae consigo la generación de elevadas cantidades de residuos que, si no se aprovechan bajo el concepto de economía circular, generan impactos nocivos en el ambiente. Estos impactos ambientales debidos al mal manejo de la eliminación de residuos se pueden describir de la siguiente manera:

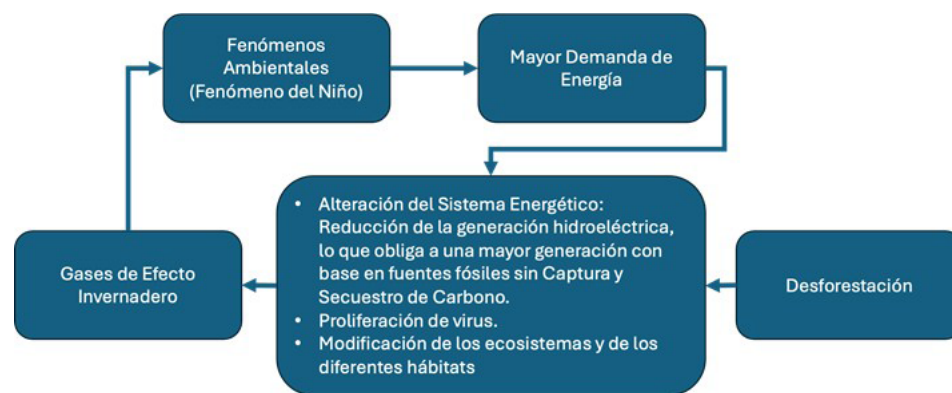


Figura 1. Esquema del círculo vicioso provocado por un inadecuado uso de recursos energéticos

- Contaminación del aire: es la acumulación de grandes cantidades de residuos en lugares inapropiados que se descomponen lentamente, provocando malos olores, proliferación de organismos nocivos y liberación de gases contaminantes como el metano (CH_4). El metano producido por la fermentación anaerobia tiene un potencial de calentamiento global 27 veces mayor que el dióxido de carbono (CO_2).
- Contaminación del agua: cuando los residuos se disponen en zonas sin una capa impermeable que proteja y aisle el suelo, los líquidos percolados de la descomposición y compresión de los residuos se filtran a través del suelo, contaminando las aguas subterráneas. Además, los desechos arrastrados por los ríos se depositan en lagos y océanos, lo que también contribuye a la contaminación de estos cuerpos de agua.
- Degradación de los suelos: la acumulación de residuos de diferentes fuentes en el suelo altera sus propiedades físicas y químicas, lo que reduce su fertilidad, capacidad de aireación, retención de agua y porosidad, y aumenta el riesgo de incendios.
- Alteración de los ecosistemas: la acumulación de residuos sin control disminuye la capacidad de regeneración del ecosistema, lo que afecta negativamente los hábitats y las especies que los habitan. Por ejemplo, los residuos que se acumulan en el fondo marino impactan la vida marina y las cadenas tróficas.

En Colombia se han implementado estrategias holísticas para abordar problemáticas ambientales que integran la gestión de residuos, el suministro energético y el desarrollo territorial. Un ejemplo notable es el caso de las playas de Necoclí, Antioquia, que son la principal fuente de ingresos económicos del municipio debido a su atractivo turístico. Sin embargo, la acumulación de recursos madereros provenientes del Chocó, que llegan a través del golfo de Urabá, ha convertido estas playas en un espacio inaccesible para la recreación. Los habitantes locales se ven obligados a apilar y quemar la madera para evitar problemas ambientales, lo que a su vez genera emisiones de gases de efecto invernadero. Para abordar este problema, se implementó un gasificador que convierte la madera en energía eléctrica para el pueblo (**Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas-IPSE**, 2011a,b). Otro ejemplo es el caso de Isla Fuerte, que es un lugar aislado del continente y no tiene acceso a energía. Como solución, fue necesario instalar un sistema de refrigeración solar y otro de potabilización de agua mediante energía solar para impulsar su economía.

Otro caso se relaciona con las grandes ciudades colombianas, donde los residuos de podas de jardines y zonas verdes terminan en vertederos, desaprovechando su potencial energético y generando emisiones innecesarias (**IPSE**, 2011a). Para solucionar este problema, se desarrolló el proyecto Esquema híbrido de poligeneración (termoquímico-biológico) para la sustitución de fósiles a partir de residuos orgánicos (contrato ICETEX 2022-0666, convocatoria 890 del Ministerio de Ciencias, Innovación y Tecnología). El proyecto integra tecnologías de pirólisis, gasificación y biodigestión para producir biochar, biometano y energía a partir de residuos domésticos y de podas (**Figura 2**).

Estos ejemplos demuestran que la transición hacia sistemas energéticos más limpios y la valorización de los residuos no son meras ideas abstractas; son soluciones viables y ya comprobadas en el contexto colombiano. Sin embargo, para que dejen de ser casos aislados y se conviertan en una estrategia de desarrollo integral, es crucial comprender las condiciones estructurales favorables que tiene Colombia, así como los obstáculos concretos que enfrenta.

En el país la industrialización de los productos agrícolas se concentra principalmente en las grandes ciudades. Este encadenamiento productivo resulta en una concentración significativa de esfuerzos económicos del Estado, iniciativas de desarrollo de los industriales y capital humano especializado. Sin embargo, esta centralización productiva no solo contradice los principios del desarrollo sostenible, sino que desperdicia una cantidad considerable de biomasa residual generada precisamente en áreas sin la infraestructura necesaria para aprovecharla. Por ello, el uso y la valorización de la biomasa residual deben

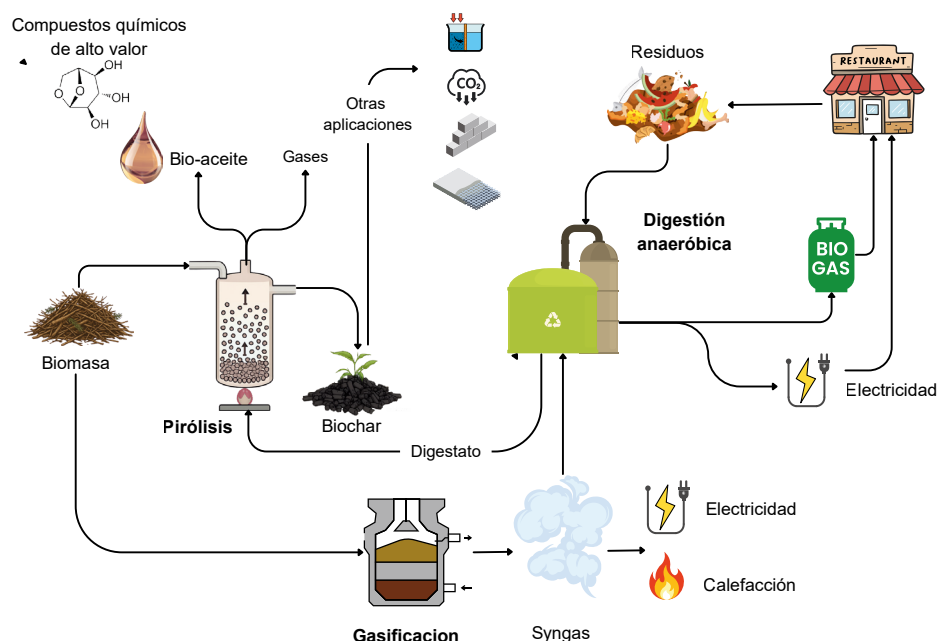


Figura 2. Esquema de una alternativa de combinación de procesos termoquímicos (pirólisis y gasificación) con proceso biológico (digestión anaeróbica) para el aprovechamiento de residuos de podas de una ciudad y de residuos domésticos de restaurantes

ser descentralizados, es decir, las inversiones deben enfocarse en las regiones agrícolas, cerca de la fuente de biomasa. En Colombia esto requiere un encadenamiento productivo, estatal y educativo bajo una visión integral de desarrollo.

Las agroindustrias a gran escala que operan unidades de procesamiento de productos forestales y agrícolas, como la madera, la palma de aceite, el arroz y el café, entre otros, generan naturalmente biomásas residuales. Estas industrias ofrecen condiciones óptimas para la valorización viable de dichas biomásas.

De todos los productos que se pueden obtener de la valorización térmica de la biomasa, como se muestra en la **Figura 2**, el biochar destaca por su amplio potencial de uso y aplicación en diversos sectores, desde la agroindustria y la captura de carbono hasta industrias de alta tecnología, incluidos materiales para aplicaciones específicas como la electrónica y el desarrollo de sensores. Sin embargo, esta versatilidad tiene un precio: no hay un biochar que sirva para todo. Un material que funcione de maravilla para mejorar los suelos podría ser inútil para la catálisis y uno que dé resultados increíbles en el laboratorio podría ser imposible de replicar a gran escala.

Aquí exploramos las diversas facetas de la versatilidad del biochar, profundizando en su fenomenología y en las reacciones responsables de sus múltiples funcionalidades y propiedades. Además, se enfatiza la importancia de comprender estos factores para desarrollar una ingeniería y generar diseños de biochar eficaces y adecuados para la industria colombiana.

Los desechos agroindustriales: una oportunidad para una transición energética inteligente

Los residuos agroindustriales no son exclusivamente un problema de disposición; son un recurso subutilizado con una composición química que los convierte en materia prima estratégica para producir biochar y otros productos de valor agregado. Para entender por qué, primero hay que saber de qué están hechos.

La fracción orgánica de la biomasa vegetal está compuesta principalmente por tres tipos de biopolímeros: celulosa, hemicelulosas y lignina. Cada uno de estos biopolímeros se descompone térmicamente de manera característica y a temperaturas distintas, lo que

influye en la cantidad y calidad del biochar que se produce. La celulosa se descompone entre los 300 y los 400 °C, mientras que las hemicelulosas se descomponen entre los 200 y los 300 °C. En ambos casos, una parte importante de su masa se convierte en gases y bioaceite, lo que resulta en una contribución moderada al biochar. Por otro lado, las ligninas son más estables térmicamente. Debido a su heterogeneidad, su descomposición térmica ocurre en un amplio rango de temperaturas, aproximadamente entre 200 y 900 °C. Las ligninas se descomponen con pérdidas de masa relativamente bajas, lo que las convierte en las principales responsables de la producción de biochar.

La proporción relativa de estos tres biopolímeros varía según el tipo de biomasa y tiene un impacto significativo en las propiedades del biochar resultante. Las materias primas con alto contenido de lignina generalmente producen biochar con mayor contenido de carbono y mayor estabilidad térmica, lo que las hace ideales para aplicaciones de secuestro y captura de carbono. Asimismo, los minerales presentes en la biomasa juegan un papel crucial en la pirólisis. Permanecen en la fase sólida y se convierten en óxidos al reaccionar con el oxígeno liberado de los grupos funcionales de la biomasa. Este proceso da como resultado un biochar con mayor contenido de ceniza. Más allá de su cantidad, la presencia de estos minerales tiene un impacto cualitativo significativo. Actúan como catalizadores durante la carbonización, acelerando reacciones que alteran la estructura molecular del biochar. Además, funcionan como agentes estabilizantes, protegiendo o inhibiendo la descomposición de ciertas estructuras. Como resultado, dos muestras de biochar producidas a la misma temperatura y a partir de la misma biomasa, pero con diferente contenido mineral, pueden tener propiedades funcionales muy distintas.

En general, la celulosa constituye entre el 30 y el 50 % del peso seco, la hemicelulosa entre el 20 y el 40 % y la lignina entre el 15 y el 35 %. Además, contiene otros componentes como extractivos y minerales que representan menos del 10 % del peso (**IPSE**, 2011a). A nivel de composición elemental, la biomasa lignocelulósica, que incluye residuos agroindustriales, herbáceas y maderas, está compuesta principalmente por carbono (37–53 % en peso), oxígeno (32–49 % en peso) e hidrógeno (4–8 % en peso). Esta composición resulta de la fotosíntesis, en la que el CO₂ y el agua reaccionan para formar estos elementos. Además, la biomasa lignocelulósica contiene otros compuestos como el nitrógeno (0,05–1,5 %) y concentraciones de minerales como potasio (K) y silicio (Si) que pueden superar el 5 %. Otros minerales, como el calcio (Ca), el cloro (Cl), el magnesio (Mg), el sodio (Na), el aluminio (Al) y el azufre (S), pueden participar hasta con un 1 a 2 %. El hierro (Fe) puede contribuir hasta en un 0,5 %, mientras que el manganeso (Mn) y el zinc (Zn) pueden estar presentes hasta en 100 ppm. Otros minerales como el bario (Ba), el cobalto (Co), el cromo (Cr), el cobre (Cu), el molibdeno (Mo), el níquel (Ni), el plomo (Pb) y el estroncio (Sr) pueden participar en concentraciones inferiores a 10 ppm. Estos minerales son absorbidos del suelo y de aditivos del suelo como los fertilizantes a través del sistema radicular de la planta (**Chejne-Janna et al.**, 2024) (**Figura 3**).

Los residuos agrícolas como la paja de maíz, el rastrojo de maíz, la cascarilla de arroz, la paja de arroz y la paja de trigo tienen una concentración global de elementos inorgánicos más alta que la biomasa de madera. Sin embargo, las concentraciones de estos compuestos inorgánicos varían dentro de la biomasa y se distribuyen entre diferentes fracciones. En este sentido, **Werkelin et al.** (2010) investigaron las concentraciones de los elementos formadores de ceniza (Si, Al, Fe, Ca, Mg, Mn, K, Na, P, S y Cl) en varias partes de árboles de abeto, pino, abedul y álamo.

Las distintas partes del maíz tienen diferentes cantidades de cenizas. Las hojas tienen el 10,4 % en peso, las vainas foliares el 6,9 %, los nudos el 4,0 %, las brácteas o envolturas de la mazorca el 3,7 %, los entrenudos el 3,5 % y los olotes o mazorcas sin grano el 1,5 %. Esto quiere decir que la mezcla de diferentes partes de un mismo cultivo crea una materia prima con un perfil mineral que cambia, lo que resulta en un biochar con propiedades menos predecibles. Estudios en especies forestales del norte de Europa muestran patrones parecidos. Por ejemplo, en los pinos la concentración de potasio en los brotes es de 8.790 ppm, más de veinte veces mayor que en la madera del tronco, que tiene 407 ppm. En los

álamos, la diferencia entre las hojas y la madera es de casi 65 veces. Aunque estos datos son de especies que no se usan en la agroindustria colombiana, el principio que muestran es universal: la parte de la biomasa que se elige como materia prima no es un detalle técnico, sino una decisión importante en el diseño del biochar.

El efecto catalítico de los minerales sobre los procesos termoquímicos va más allá del biochar; influye en todo el espectro de productos que se pueden obtener de la valorización de la biomasa residual. Como se muestra en la **Figura 4**, este espectro es increíblemente amplio. Los compuestos de una sola unidad de carbono (C1), como CO, CO₂, CH₄ y metanol (CH₃OH), son los productos más simples y los primeros en liberarse durante la descomposición térmica.

A medida que aumenta la complejidad molecular, aparecen compuestos C2 como el etanol y el etilenglicol; C3 como el glicerol y el ácido láctico; C4 como los ácidos succínico y fumárico y C5–C6 como el ácido levulínico, el xilitol, el sorbitol y el hidroximetilfurfural (HMF). Este último se considera uno de los compuestos de plataforma más prometedores de la química verde. Los ácidos aromáticos como el gálico y el ferúlico completan un catálogo de productos que abarca desde combustibles y gases de síntesis hasta precursores para la industria farmacéutica, la alimentaria y la de materiales (**Jiang *et al.*, 2019; Werpy & Petersen, 2004**). El biochar, como producto sólido de este mismo proceso, es parte fundamental de ese sistema de valorización y es el foco principal de este artículo.

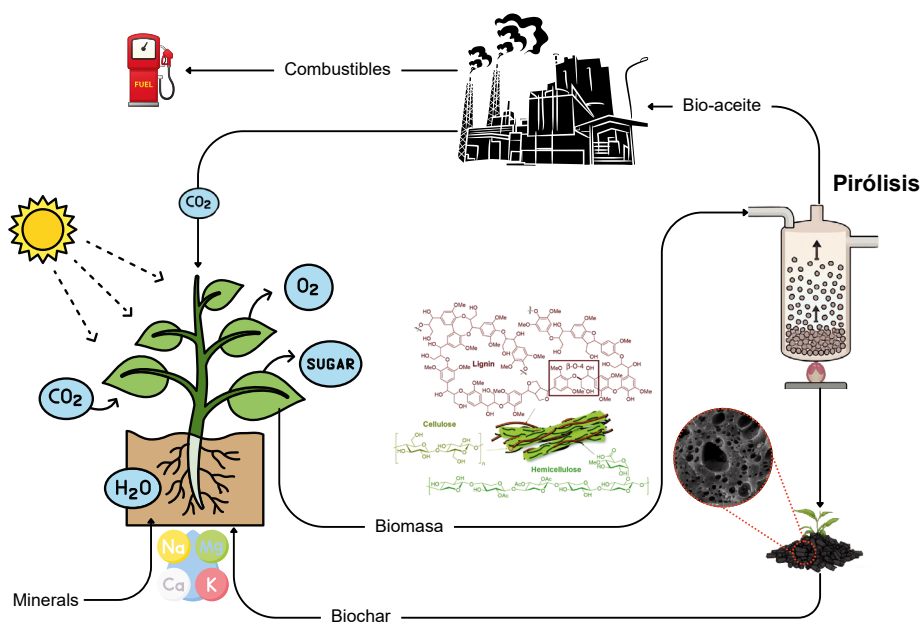


Figura 3. Ciclo de la biomasa como un modelo de economía circular

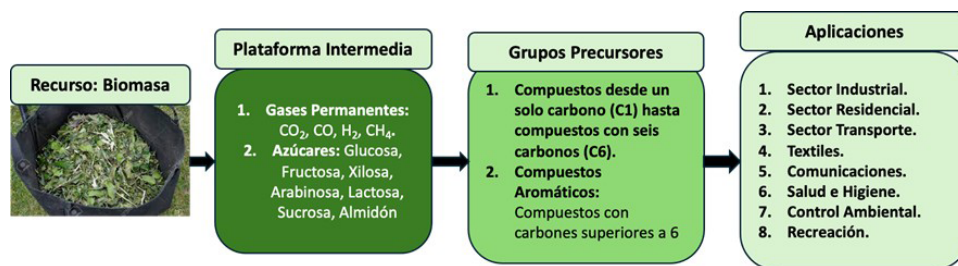


Figura 4. Esquema ilustrativo de los diferentes grupos de productos que pueden obtenerse de la pirólisis de biomasa

Más allá de los procesos termoquímicos descritos a continuación, este catálogo de productos también puede obtenerse mediante rutas biológicas. Una amplia gama de transformaciones de azúcares a componentes básicos puede llevarse a cabo mediante fermentación aeróbica utilizando hongos, levaduras o bacterias, así como mediante transformaciones químicas y enzimáticas. Las transformaciones más frecuentes involucradas en la conversión de precursores en derivados incluyen la reducción química, la oxidación, la deshidratación, la ruptura de enlaces y la polimerización directa; entre ellas, las biotransformaciones enzimáticas representan el grupo más numeroso. Estas rutas biológicas y los procesos termoquímicos que se describen a continuación constituyen, en conjunto, las tecnologías disponibles para convertir la biomasa residual en productos de alto valor agregado.

Procesos para transformar la biomasa en productos de alto valor agregado

Al estar en una fogata, puedes sentir las llamas que salen de la parte superior de la leña, oler el humo, sentir el calor, escuchar el crujido de la madera y ver el carbón y las cenizas que quedan cuando el fuego se apaga. Estos son los resultados de diferentes procesos termoquímicos: torrefacción, pirólisis, combustión y gasificación. Si la biomasa está húmeda, como en los residuos domésticos, se recomiendan procesos biológicos como la fermentación, la digestión anaeróbica, los procesos de extracción, la transesterificación y las celdas de combustible microbianas, como se ilustra en la **Figura 5** (Jain *et al.*, 2022; Okolie *et al.*, 2021).

En los procesos termoquímicos, las condiciones de operación son fundamentales para obtener el producto deseado. Factores como la temperatura, el tiempo que la biomasa permanece en el reactor y la velocidad a la que se alcanza la temperatura especificada juegan un papel crucial (Figura 6) (Chejne-Janna *et al.*, 2024).

Torrefacción

La torrefacción es un método de pretratamiento que se realiza a temperaturas de 200 a 300 °C en ausencia de oxígeno. Exige secar completamente la biomasa antes de someterla a torrefacción, lo que resulta en la pérdida de su estructura fibrosa, la eliminación parcial de las hemicelulosas y la deshidratación de la celulosa. Este proceso mejora significativamente la molienda y el poder calorífico de la biomasa (Granados *et al.*, 2019). La torrefacción de la biomasa ofrece varias ventajas antes de la gasificación (Córdoba-Ramírez *et al.*, 2024): reduce significativamente el consumo de electricidad

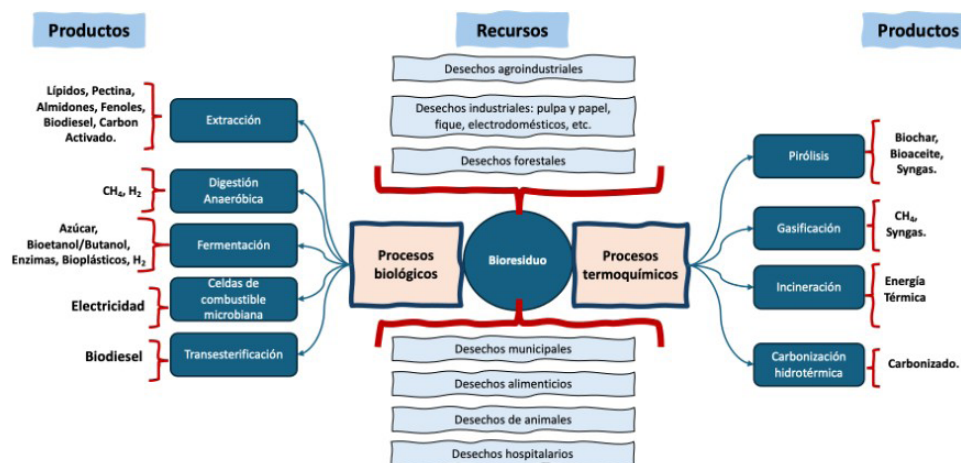


Figura 5. Esquema de las diferentes fuentes de biomasa y los diferentes procesos termoquímicos y biológicos para aprovecharla, así como las principales aplicaciones. Gráfica adaptada de Jain *et al.* (2022)

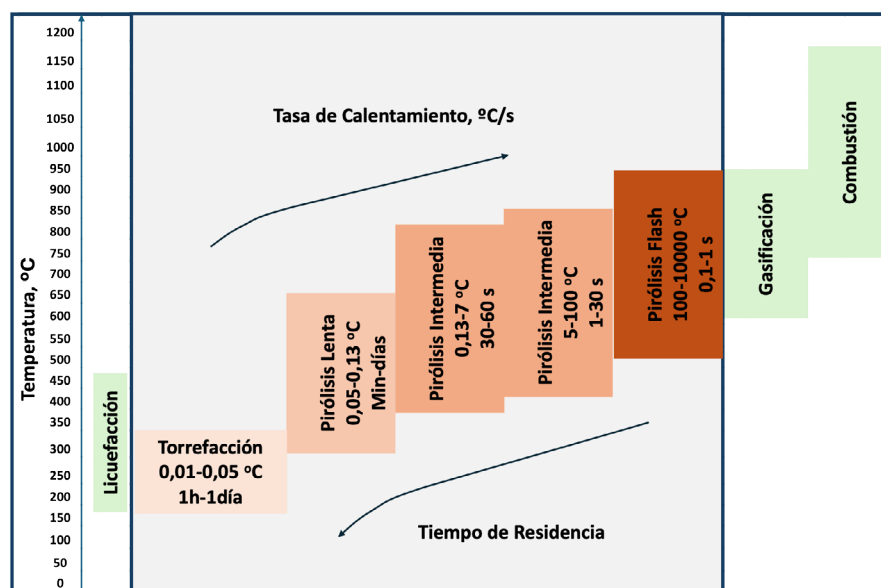


Figura 6. Condiciones de operación requeridas para cada proceso termoquímico (tomada de Chejne-Janna *et al.*, 2024).

para la molienda (alrededor del 85 %); la descomposición de la hemicelulosa y la despolimerización de la celulosa durante la reacción de tostado disminuyen la estructura de la fibra y la dureza de la biomasa, y también provoca modificaciones sustanciales en la estructura de la celulosa y la lignina.

Pirólisis lenta

La pirólisis lenta de biomasa, también conocida como carbonización térmica, es una tecnología eficiente para producir biochar. Normalmente se realiza a temperaturas entre los 400 y 800 °C, con una velocidad de calentamiento lenta, de 5 a 7 °C por minuto, y un tiempo de residencia prolongado, de más de una hora. Estos factores provocan la despolimerización y el fraccionamiento de las estructuras originales de la biomasa, que están compuestas principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina. La formación de biochar se ve favorecida por reacciones de reordenamiento intra e intermolecular, que aumentan el grado de reticulación de la estructura carbonosa y, en consecuencia, la estabilidad térmica del residuo sólido. Los pasos principales involucran la formación de anillos de benceno, su combinación en una estructura policíclica y la liberación de gases condensables y permanentes.

La despolimerización corresponde a la ruptura progresiva de los enlaces que unen las unidades monoméricas de los polímeros; conserva en gran medida la identidad química de las unidades estructurales originales, produciendo monómeros, dímeros y oligómeros. Cada evento de escisión genera nuevos extremos de cadena que posteriormente experimentan reacciones de estabilización. Como consecuencia, el grado de polimerización disminuye hasta producir especies moleculares suficientemente pequeñas para volatilizarse. Estas especies, generalmente condensables a temperatura ambiente, constituyen una fracción importante de los productos líquidos y suelen encontrarse como monómeros, dímeros y trímeros directamente derivados de la estructura polimérica inicial.

La fragmentación corresponde a la ruptura de múltiples enlaces covalentes dentro de la estructura polimérica, incluyendo aquellos presentes en las unidades monoméricas. Como resultado, se generan gases permanentes o incondensables (CO , CO_2 , CH_4 , H_2), así como una amplia gama de compuestos orgánicos de bajo peso molecular y cadena corta que pueden condensarse a temperatura ambiente. En la pirólisis de biomasa, la celulosa

suele experimentar una despolimerización importante, produciendo levoglucosano y anhidroazúcares; la lignina tiende a experimentar más fragmentación, condensación y aromatización, y la competencia entre despolimerización, fragmentación y reticulación-aromatización determina finalmente los rendimientos de bioaceite, gases y biochar.

Pirólisis rápida

La pirólisis rápida se caracteriza por una velocidad de calentamiento superior a 100 °C/s, un tiempo breve de residencia de los gases, entre 0,1 y 3 segundos, y una temperatura del reactor de alrededor de 550 °C. Estas condiciones promueven una rápida descomposición de la biomasa y una rápida condensación del vapor, lo que da como resultado la conversión de la biomasa principalmente en un producto líquido conocido como bioaceite. La pirólisis rápida facilita la producción de más de 500 productos diferentes, que pueden servir como materia prima para nuevos productos de valor agregado en las industrias farmacéutica, alimentaria y agrícola.

Por otro lado, la pirólisis ultrarrápida o flash es un proceso de descomposición térmica de la materia orgánica extremadamente rápido (~1.000 °C/s). Este proceso produce principalmente gases (aerosoles), que pueden condensarse para producir bioaceite como principal producto (60–70 %), además de generar biochar (10–15 %) y gases pirolíticos (15–20 %) (Boateng, 2020; Li *et al.*, 2020).

Gasificación

La gasificación es un proceso endotérmico que transforma materiales carbonosos, como la biomasa, en gases ricos en monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H₂). Esto se logra provocando la reacción de la materia prima a altas temperaturas, entre los 800 y los 1.200 °C, con una cantidad controlada de un agente gasificante. Este agente puede ser aire, oxígeno, vapor de agua, dióxido de carbono (CO₂) o una combinación de estos. La mezcla de gases resultante, conocida como gas de síntesis o syngas, tiene un poder calorífico de bajo a medio. Su composición, que incluye CO, CH₄ e H₂, varía según la matriz carbonosa y el agente gasificante. Como se ilustra en la Figura AS (suplementaria) (Spath & Dayton, 2003), el syngas es un excelente precursor para una amplia gama de productos, dependiendo de la ruta o catalizador utilizado.

La gasificación de materia orgánica tiene varias etapas: secado, devolatilización, pirólisis y, finalmente, gasificación. Como la gasificación es un proceso endotérmico, es común que una parte de la materia orgánica se queme durante el proceso, generando la energía necesaria para las reacciones de gasificación. A estos procesos se les conoce como autotérmicos. Además de syngas, la gasificación de biomasa también produce líquidos que pueden ser utilizados por la industria alimenticia y otras, así como biochar, que se puede usar para el secuestro de carbono en suelos, lo que lleva a un balance negativo de CO₂ cuando se analiza el sistema global.

Formación y evolución estructural del biochar durante la pirólisis

Las condiciones de operación durante la pirólisis moldean la naturaleza del material resultante. A medida que la temperatura aumenta, la biomasa experimenta transformaciones progresivas, lo que lleva a la liberación de compuestos condensables, gases permanentes y biochar como uno de los productos de mayor impacto (Figura 7). Si bien los mecanismos fundamentales ocurren a escala cuántica, sus efectos se manifiestan en escalas superiores, desde la molecular hasta la macroscópica (Li *et al.*, 2020).

La formación del biochar comienza con el secado de la biomasa original, seguido del craqueo de grupos funcionales, la despolimerización, las desramificaciones, la escisión de grupos glucósidos y las reacciones de deshidratación, descarboxilación y descarbonilación. Posteriormente, se llevan a cabo las desramificaciones, la descarboxilación, la remoción de grupos éteres y las reacciones sólido-gas continuas con deshidrogenación (Figura 7).

La formación del biochar se ve influenciada por la temperatura y la velocidad de calentamiento, comenzando con la condensación de grupos alifáticos, seguida de la condensación de estructuras ramificadas y la formación de macromoléculas precursoras de la

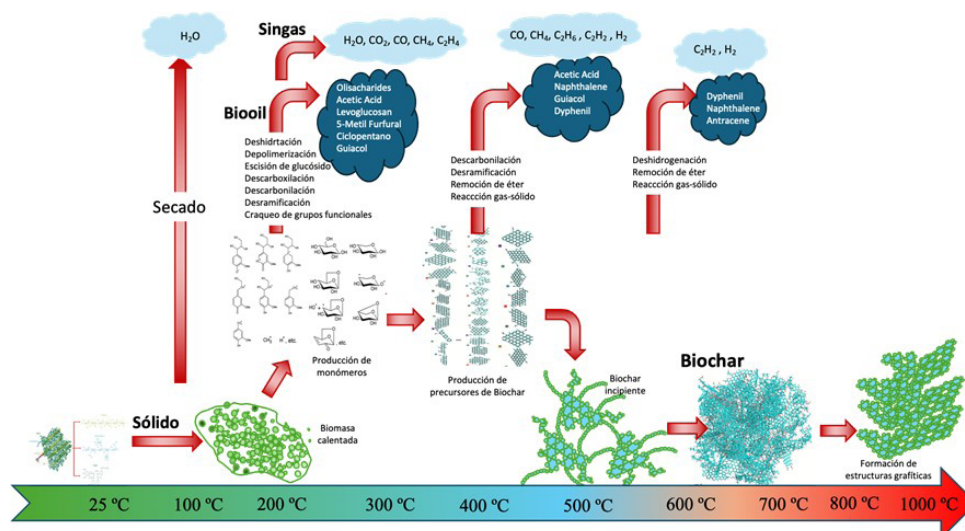


Figura 7. Esquema de las transformaciones de la biomasa durante la pirólisis

estructura sólida que se convertirá en biochar. El proceso avanza con la condensación de anillos difusos con muy pocos grupos funcionales. A temperaturas superiores a los 700 °C, se produce la reordenación de las capas aromáticas, formando estructuras más organizadas de tipo grafítico (**Figura 7**).

El biochar derivado de la biomasa con un contenido de carbono que oscila entre el 40 % y el 90 % presenta una estructura amorfa, abundantes grupos funcionales superficiales, nanoestructuras y porosidad. Se distingue del carbón activado porque tiene un contenido de carbono más alto, entre el 80 % y el 95 %, una estructura amorfa y una alta porosidad; en algunos casos, el área superficial interna supera los 2.000 m²/g. Además, el biochar se diferencia del negro de carbono (*carbon black*), que se produce a partir del petróleo, los alquitranes del carbón y otros materiales, por tener un contenido de carbono superior al 95 % y una estructura microcristalina o partículas de carbono amorfas.

Como ya se mencionó, la proporción de biochar en los productos de la pirólisis depende mucho de la velocidad de calentamiento, el tiempo que la biomasa permanece en el reactor y la temperatura del proceso. Por lo tanto, el tamaño de las partículas de biomasa influye en las reacciones secundarias que pueden ocurrir dentro de ellas. Este factor puede evaluarse usando el número de Biot (*Bi*), que relaciona la transferencia de energía desde el exterior con el transporte de energía dentro de la partícula:

$$Bi = hL_c / \lambda,$$

donde *h* es el coeficiente de transferencia de calor, *L_c* es la longitud característica de la partícula asociada a su tamaño y *λ* es la conductividad térmica de la partícula. Con base en esta definición, se espera que los números de Biot elevados (> 0,1) y las temperaturas altas (> 600 °C) provoquen reacciones secundarias entre los gases y líquidos generados durante la pirólisis, así como en el biochar que se va formando. Además, es crucial considerar el tiempo de residencia de los gases dentro de la partícula y en el reactor. Este tiempo es esencial para que las reacciones químicas ocurran y está determinado por dos números adimensionales. El número de pirólisis I (*Py I*) relaciona el transporte de energía dentro de la partícula con la velocidad de reacción, mientras que el número de pirólisis II (*Py II*) relaciona la transferencia de energía desde el exterior a la partícula con la velocidad de reacción.

$$Py I = \frac{\lambda}{\rho C_p L_c^2 k} \quad Py II = \frac{h}{\rho C_p L_c k},$$

donde ρ es la densidad del material, C_p es el calor específico del material y k es la velocidad de reacción global que ocurre para que la pirólisis tenga lugar. La Figura BS ilustra cómo los números de pirólisis y de Biot influyen en el fenómeno predominante (Cheng & Li, 2018). En el caso de partículas grandes, con un alto número de Biot y un bajo número de pirólisis, el proceso se ve limitado por el transporte de energía dentro de la partícula. Esto significa que la información térmica se propaga mucho más lentamente que la velocidad a la que ocurren las reacciones químicas. Por otro lado, las partículas pequeñas (con un bajo número de Bi) experimentan limitaciones diferentes. A temperaturas bajas, la cinética química limita el proceso, mientras que a temperaturas altas, la transferencia de calor se convierte en el factor limitante.

Considerando factores como el tiempo, el tamaño, la velocidad de reacción, el transporte y la transferencia de energía, la pirólisis se puede resumir como un fenómeno que reduce las relaciones hidrógeno/carbono (H/C) y oxígeno/carbono (O/C), como se muestra en la Figura CS (Shao *et al.*, 2024). Este proceso se aplica a materiales con valores altos de H/C y O/C. Al calentarlos, estas relaciones disminuyen, como se indica con la flecha roja en el gráfico de la Figura CS.

La dirección de esta disminución se alinea con el fenómeno que ocurre durante la pirólisis (flechas negras en la Figura CS). Por ejemplo, la deshidratación reduce tanto el hidrógeno como el oxígeno, lo que lleva a una disminución simultánea de las relaciones H/C y O/C. Por otro lado, la descarboxilación disminuye la cantidad de oxígeno en el biochar producido sin una reducción significativa del hidrógeno. En contraste, la desmetilación reduce considerablemente la proporción de hidrógeno y, en menor medida, la cantidad de oxígeno. Además, el aumento de la temperatura intensifica aún más la reducción de las relaciones H/C y O/C.

Si el biochar producido tiene una relación H/C menor a 0,7, es altamente estable en el suelo y puede permanecer enterrado por muchos años sin degradarse significativamente, lo que lo hace efectivo para el secuestro de carbono y la generación de carbono negativo en el ambiente (Cheng & Li, 2018).

Defectos intrínsecos y extrínsecos

Los sitios defectuosos son más activos que los átomos de carbono aromáticos en los planos basales debido a su alta densidad de electrones desapareados. Los defectos intrínsecos incluyen distorsiones de red, vacancias de carbono, arreglos no hexagonales y defectos de borde, como las redes conjugadas anómalas. Por otro lado, los defectos extrínsecos se refieren a la funcionalización con heteroátomos y los defectos inducidos por dopaje, que pueden involucrar elementos metálicos o no metálicos.

Los defectos topológicos en los carbones porosos se refieren a distorsiones en la red de carbono causadas por la presencia de arreglos no hexagonales y enlaces colgantes, como pentágonos, defectos Stone–Wales o vacancias. Las vacancias ocurren cuando se eliminan uno o más átomos de carbono de una capa tipo grafeno, creando sitios de borde. Esta pérdida de átomos de carbono lleva a la formación de enlaces covalentes y a una deformación de la estructura debido a cambios en las longitudes de enlace. Los defectos Stone–Wales (SW) se forman cuando se altera la conectividad entre dos átomos de carbono enlazados, lo que resulta en anillos no hexagonales, como pares pentágono–heptágono u octágono–pentágono. Estos defectos son comunes en los carbones porosos porque se introducen naturalmente durante las reacciones de reorganización térmica, como la carbonización, gasificación y grafitización. Sin embargo, su observación es complicada debido a la estructura tridimensional de los carbones porosos.

Grupos funcionales

Los biochars tienen muchos menos grupos funcionales que la biomasa de la que provienen. Estos grupos están relacionados con los que originalmente estaban en la biomasa, pero han cambiado debido a reacciones químicas. Los grupos que más abundan son los que tienen carbono y oxígeno, como los arilo, hidroxilo y carbonilo. En la **Figura 8** se ilustran algunos

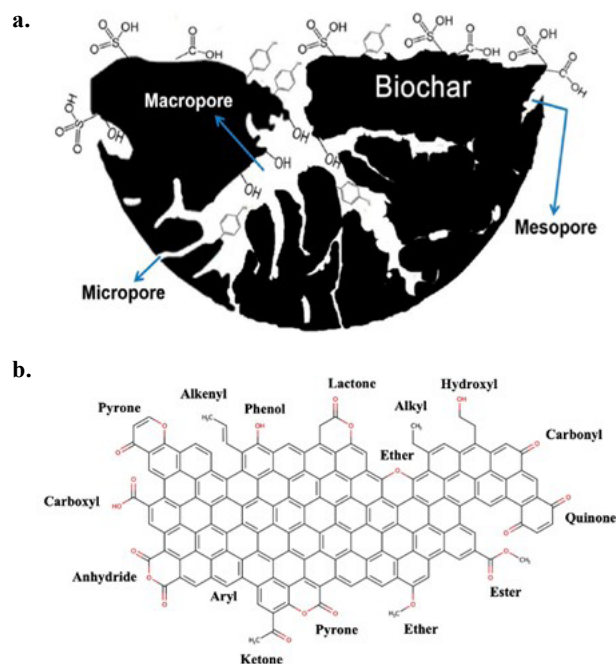


Figura 8. Esquemas ilustrativos de la estructura de un biochar con sus grupos funcionales. **a)** Biochar a escala de partícula indicando los poros y los grupos funcionales (Lee *et al.*, 2017). **b)** Biochar a escala molecular indicando las estructuras de anillos aromáticos con sus grupos funcionales (Cheng & Li, 2018).

ejemplos de estos grupos (Wood *et al.*, 2024a, 2024b). También puede haber grupos que tienen nitrógeno, fósforo y azufre, dependiendo de la biomasa original, pero estos son mucho menos comunes que los que tienen oxígeno. Las diversas aplicaciones del biochar dependen de la cantidad y del tipo de grupos funcionales que contiene.

Estructuras moleculares aromáticas

Las estructuras moleculares aromáticas en el biochar se caracterizan por sus índices de aromaticidad (la proporción de carbonos aromáticos) y el tamaño de sus dominios aromáticos (el número de anillos aromáticos conjugados dentro de dominios poliaromáticos). Tres compuestos simples, el benceno, el naftaleno y el butilbenceno, sirven como ejemplos para comprender estas propiedades. Tanto el benceno como el naftaleno tienen índices de aromaticidad del 100 %, mientras que el butilbenceno, debido a su grupo alquilo, tiene un índice de aromaticidad del 60 % (6 de 10 carbonos participan en estructuras moleculares aromáticas). En cuanto al tamaño del dominio aromático, tanto el benceno como el butilbenceno tienen un dominio de un anillo, mientras que el naftaleno tiene un dominio de dos anillos. Esto destaca la importancia de ambas propiedades para definir las estructuras moleculares aromáticas del biochar.

Para entender bien las estructuras moleculares aromáticas del biochar, deben conocerse tanto los índices de aromaticidad como el tamaño de los dominios aromáticos. La resonancia magnética nuclear de estado sólido de ^{13}C (NMR) ayuda a detectar los diferentes entornos químicos en una muestra de biochar. Con esta información, se puede calcular el índice de aromaticidad comparando la proporción de entornos químicos aromáticos y no aromáticos. Además, técnicas de oxidación selectiva como el método del ácido policarboxílico de benceno (*benzene polycarboxylic acid*, BPCA) permiten la cuantificación precisa del porcentaje de carbono aromático. Estas técnicas también proporcionan información sobre la cantidad de grupos funcionales conectados a las estructuras aromáticas, así como una estimación del tamaño de dichas estructuras en el biochar (Sierra-Jimenez *et al.*, 2024).

Grafitización y cristalinidad

Los materiales ricos en carbono se dividen en dos categorías: grafitizable y no grafitizable. Los materiales grafitizables forman nanoestructuras parecidas al grafito cristalino cuando se calientan a temperaturas entre los 2.200 y los 3.000 °C. Los materiales no grafitizables, en cambio, resisten este proceso de ordenamiento y permanecen mayormente amorfos, incluso a temperaturas superiores a los 3.000 °C. La diferencia estructural entre los dos se debe a la formación de defectos, como anillos no hexagonales, dentro de sus nanoestructuras aromáticas, defectos que introducen curvatura y alteran el empaquetamiento, limitando el ordenamiento a largo plazo. El biochar, en general, tiene una cristalinidad gráfitica mínima y, aunque rara vez se calientan a temperaturas tan altas como los 2.200 °C, se consideran materiales no grafitizables.

Principales aplicaciones del biochar y su relación con las características estructurales

El desempeño del biochar en cualquier aplicación depende de la combinación de sus propiedades químicas, sus características superficiales (como la arquitectura de sus poros), su estructura molecular aromática, sus propiedades físicas (como densidad, conductividad y resistencia mecánica) y su composición mineral. Por lo tanto, utilizar técnicas avanzadas para caracterizar la biomasa como precursor y el biochar como producto es el camino recomendado para guiar el aprovechamiento de los residuos agroindustriales. En la **Tabla 1** se presenta un resumen conciso de las características principales, la técnica de caracterización más relevante y la información que puede obtenerse mediante dicha prueba.

Tabla 1. Técnicas de caracterización del biochar y su relevancia en distintas aplicaciones

Característica	Técnica de caracterización	Lo que revela para aplicaciones
Relación H/C y O/C	Análisis elemental (CHNS-O); diagrama de van Krevelen	H/C<0,7 → estabilidad en suelo para secuestro de C; O/C alto → mayor adsorción iónica
Estructura aromática (aromaticidad y tamaño de dominio)	¹³ C NMR de estado sólido; BPCA	El índice de aromaticidad y el tamaño de dominio policíclico determinan la estabilidad y la conductividad
Cristalinidad gráfitica	Difracción de rayos X (XRD); ecuación de Scherrer	Altura de apilamiento y tamaño de cristalito → conductividad eléctrica y compatibilidad con grafeno
Grupos funcionales superficiales	FTIR; XPS; titulación Boehm	–OH, –COOH, C=O: sitios de anclaje de metales y adsorción; grupos N: pseudo-capacitancia en electrodos
Porosidad y área superficial	Adsorción de N ₂ (BET, BJH); porosimetría de Hg	Microporos → adsorción de gases y moléculas pequeñas; mesoporos → difusión de iones y catálisis
Defectos (intrínsecos y extrínsecos)	Espectroscopía Raman (banda D/G); EPR (paramagnetismo)	Relación D/G alta → más defectos → mayor reactividad; EPR detecta densidad de electrones desapareados útiles en catálisis
Contenido mineral / cenizas	Análisis termogravimétrico (TGA); fluorescencia de rayos X (XRF); plasma acoplado inductivamente (ICP)	Cenizas con K, Ca, Mg → mejora de suelos; metales tóxicos (Pb, Cr) limitan aplicaciones médicas
Estabilidad térmica	TGA en atmósfera oxidante	Alta estabilidad → secuestro de carbono permanente; baja estabilidad → riesgo de degradación en suelo

Lawal *et al.* (2027) analizaron una nueva perspectiva de la correlación entre la transformación molecular de biomasa lignocelulósica y los cambios físicos que ocurren dentro de su matriz sólida bajo condiciones de carbonización pirolítica. El concepto de “ingeniería de biochar” implica diseñar simultáneamente estas características mediante el control de las variables del proceso y la selección metódica de la biomasa precursora.

La amplia gama de aplicaciones del biochar surge de la combinación única de características texturales de los carbones porosos (Sakhiya, 2020), como sus elevadas áreas superficiales específicas, diversas arquitecturas de poros y distribuciones de tamaño de poro. Estas características se pueden modular seleccionando el precursor y la ruta de síntesis adecuados. Además, la presencia de una capa superficial formada por elementos químicamente enlazados contribuye a sus propiedades. La química superficial y la arquitectura de poros del biochar determinan su autoorganización, estabilidad química y reactividad.

Estructuralmente, los carbones porosos están compuestos principalmente por capas distorsionadas similares al grafeno. Estas capas están formadas por dominios de carbono híbrido sp^2 ricos en defectos, incluidos los enlaces colgantes (*dangling bonds*) que resultan de imperfecciones en la estructura grafitica. La química superficial, los defectos, la presencia de heteroátomos localizados en los bordes o insertados en los planos basales y los sitios de borde en los materiales carbonosos influyen significativamente en muchas de sus propiedades clave. Estas propiedades incluyen reactividad, velocidades de transferencia electrónica, capacitancia, así como propiedades ópticas, mecánicas y magnéticas. En la **Tabla 2** se presentan las principales aplicaciones del biochar, junto con las propiedades claves requeridas, las características estructurales del biochar que favorecen estas aplicaciones y las condiciones generales que facilitarían su logro.

Tabla 2. Matriz de aplicaciones del biochar *Vs.* características estructurales y condiciones de síntesis

Aplicación / Uso	Propiedad clave requerida	Característica del biochar involucrada	Condición de pirólisis favorable
Secuestro de carbono en suelos	Estabilidad química a largo plazo; baja mineralización	Alta aromaticidad; relación H/C<0,7; bajo contenido de grupos lábiles (Enders <i>et al.</i> , 2012)	T > 550 °C; pirólisis lenta; bajo contenido de celulosa/hemicelulosa
Mejoramiento de suelos agrícolas	Retención de agua y nutrientes; pH adecuado; porosidad	Alta porosidad (macro y mesoporosa); grupos funcionales –OH, –COOH; contenido de cenizas con K, Ca, Mg (Agegnehu <i>et al.</i> , 2016; Sohi <i>et al.</i> , 2009; Yuan <i>et al.</i> , 2019)	T: 400–600 °C; pirólisis lenta; biomasa con alto contenido mineral
Catálisis heterogénea (producción de biocombustibles, síntesis química)	Alta densidad de sitios activos; área superficial elevada; defectos estructurales	Defectos intrínsecos (vacancias, defecto Stone-Wales); grupos funcionales oxigenados/nitrogenados; dopaje con heteroátomos (N, P, S, B)	T: 500–800 °C; atmósfera controlada (NH ₃ , H ₂ S); activación química posterior
Adsorción de contaminantes y remediación ambiental (metales pesados, colorantes, fármacos)	Elevada área superficial específica; química superficial polar y no polar; carga superficial	Micro y mesoporosidad; grupos –OH, C=O, –COOH; EPR activo (paramagnetismo por defectos)	T: 400–700 °C; activación física o química (KOH, ZnCl ₂ , CO ₂ , vapor)
Almacenamiento electroquímico de energía (supercapacitores, baterías)	Alta conductividad eléctrica; porosidad jerárquica; capacitancia elevada	Dominios grafénicos ordenados; micro, meso y macro porosidad jerárquica; heteroátomos N, P (aumentan pseudocapacitancia)	T > 700 °C; pirólisis + activación; dopaje con N o P durante la síntesis
Soporte de catalizadores metálicos (Fe, Ni, Co, Cu)	Grupos de anclaje para precursores metálicos; estabilidad térmica; porosidad accesible	Grupos –OH, –COOH, C=O como sitios de anclaje; alta relación O/C superficial; mesoporos para difusión	T: 400–600 °C conserva grupos oxigenados; impregnación posterior del metal
Blindaje electromagnético y contrarradiación	Conductividad eléctrica; estructura dieléctrica; densidad de defectos	Alta cristalinidad grafitica; estructura sp^2 extensa; defectos extrínsecos (metales)	T > 800 °C; tratamiento térmico a altas temperaturas; dopaje metálico
Aplicaciones médicas y cosméticas (adsorción de toxinas, suplementos)	Biocompatibilidad; capacidad de adsorción selectiva; pureza	Microporosidad elevada; bajo contenido de metales tóxicos; química superficial controlada	T: 400–600 °C; biomasa de alta pureza (maderas vírgenes); activación suave

Secuestro de carbono

El empleo del biochar en la enmienda de suelos representa una estrategia prometedora para la captura de carbono a escala global. Sin embargo, su efectividad y la posibilidad de generar emisiones negativas dependen en gran medida del proceso de producción, su integración energética con líneas productivas de generación de CO₂ fósil y las características del biochar, especialmente su estabilidad frente a la mineralización microbiana. Los biochars con una relación H/C inferior a 0,7 y alta aromaticidad muestran una resistencia notable a la mineralización microbiana, que puede durar siglos o incluso milenios (Xin *et al.*, 2016). Este umbral de estabilidad se alcanza preferentemente mediante pirólisis lenta a temperaturas superiores a 550 °C. Bajo estas condiciones, las reacciones de condensación juegan un papel crucial, favoreciendo la formación de estructuras poliaromáticas con muy poco contenido de hidrógeno. A temperaturas mayores, la reorganización térmica del biochar y la eliminación de grupos funcionales oxigenados generan estructuras mucho más estables, lo que resulta en un mejor desempeño en la captura de carbono.

Mejoramiento de suelos agrícolas

La incorporación de biochar como enmienda para suelos agrícolas ha mostrado resultados positivos en la mitigación de los principales problemas asociados con el desgaste de nutrientes derivado de la agricultura extensiva (Yasir *et al.*, 2025; Correia & Rasteiro, 2025). La aplicación de biochar al suelo facilita el reciclaje de minerales extraídos durante el crecimiento de las plantas. Asimismo, la presencia de grupos funcionales superficiales (–OH, –COOH, C=O) y nitrogenados desempeña un papel crucial en esta aplicación, ya que pueden actuar como sitios de anclaje para minerales alcalinos como el NH₄⁺, K⁺ y Ca²⁺, lo que favorece la retención de nutrientes y agua. Para preservar los grupos funcionales oxigenados, se recomienda la utilización de condiciones de pirólisis a baja temperatura, ya que las reacciones de condensación se mantienen en etapas tempranas, lo que favorece la producción de biochar necesaria para los grandes volúmenes requeridos. Además, se debe priorizar el uso de biomásas con alto contenido mineral, con el fin de reciclar la mayor cantidad posible de minerales del suelo, aunque esto también dependerá de los requerimientos nutricionales específicos del suelo a tratar.

Catálisis heterogénea y soporte de catalizadores metálicos

El biochar ofrece ventajas estructurales y de síntesis frente a otros materiales utilizados como soporte para catalizadores, por ejemplo, la modulación del grado de carbonización de la biomasa, el control del tamaño de poro mediante activación, la inclusión de metales mediante el preprocesamiento de la biomasa y su posterior fijación a la estructura carbonosa a través de la pirólisis (Hughes *et al.*, 2026). Esto facilita la síntesis de catalizadores heterogéneos soportados con alta dispersión metálica y estabilidad térmica.

Asimismo, la formación de defectos superficiales ha demostrado ser una estrategia eficaz para mejorar los sitios activos en los sistemas macromoleculares aromáticos característicos del biochar y así crear sitios catalíticos para diversas aplicaciones. Estos defectos permiten una elevada densidad de electrones desapareados. Las distorsiones de la red cristalina, las vacancias de carbono, las configuraciones no hexagonales y los defectos de borde se denominan comúnmente defectos intrínsecos (por ejemplo, redes conjugadas anómalas). Por otro lado, la funcionalización con heteroátomos y los defectos inducidos por dopaje (metálico o no metálico) se consideran defectos extrínsecos. El dopaje extrínseco con heteroátomos (N, P, S, B) amplifica la densidad de sitios activos y modifica la selectividad de la reacción. La espectroscopía Raman (relación de bandas D/G) y la resonancia paramagnética electrónica (RPE) son herramientas fundamentales para cuantificar y optimizar esta densidad de defectos.

Adsorción y remediación ambiental

La capacidad de adsorción de contaminantes emergentes (metales pesados, fármacos y compuestos perfluorosulfonados) del biochar se ha convertido en uno de los temas más prolíficos en términos de publicaciones y patentes en la última década en este campo.

La principal ventaja reside en la flexibilidad de la modificación de las características superficiales del biochar, así como en la capacidad de modulación del grado de carbonización. En general, la capacidad de absorción se ve mejorada por el equilibrio entre el área superficial y las interacciones químicas específicas con el adsorbato. Los microporos (<2 nm) demuestran una eficacia particular para la adsorción de moléculas pequeñas y gases, mientras que los mesoporos (2–50 nm) facilitan el acceso de moléculas más grandes y la difusión de iones en solución (Córdoba-Ramírez *et al.*, 2024). La activación posterior, ya sea física mediante vapor o CO₂, o química con KOH o ZnCl₂, permite ampliar el área superficial hasta alcanzar valores comparables a los de los carbones activados comerciales, conservando al mismo tiempo la huella ambiental favorable del proceso de producción a partir de residuos.

Almacenamiento electroquímico de energía

En electrodos de supercapacitores, la capacitancia de doble capa eléctrica exige una superficie muy extensa y una porosidad accesible a los iones del electrolito. La incorporación de heteroátomos como el nitrógeno y el fósforo permite la introducción de pseudocapacitancia mediante reacciones farádicas superficiales de rápida cinética. La organización de dominios de tipo grafeno, que se puede lograr a elevadas temperaturas de pirólisis, optimiza la conductividad eléctrica al disminuir la resistencia eléctrica del material del electrodo.

Principio de diseño de la ingeniería de biochar

El denominador común de todas las aplicaciones previas radica en que el biochar no debe considerarse un subproducto indiferenciado de la pirólisis, sino un material diseñado con un propósito específico. El marco conceptual del biochar diseñado propone el diseño simultáneo de los siguientes elementos.

- Arquitectura de poros: micro, meso y macroporos con distribución jerárquica.
- Química superficial: tipo, densidad y acidez o basicidad de los grupos funcionales.
- Densidad y tipo de defectos: intrínsecos (vacancias, Stone-Wales) y extrínsecos (heteroátomos, metales).
- Organización estructural: índice de aromaticidad y tamaño de dominios poliaromáticos.
- Contenido mineral: concentración y especiación de K, Ca, Mg, Si y metales traza.

Estos factores son controlados mediante la selección de la biomasa precursora (composición en celulosa, hemicelulosa, lignina y contenido mineral), la temperatura de la pirólisis, la velocidad de calentamiento, el tiempo de residencia, la atmósfera del proceso y los tratamientos posteriores de activación o funcionalización (Ordóñez-Loza *et al.*, 2024). Como se describió en secciones anteriores, el diagrama de van Krevelen constituye una herramienta visual fundamental para orientar el diseño del biochar hacia la aplicación deseada.

Esta perspectiva integradora es crucial para la valorización de los residuos agroindustriales de Colombia y Latinoamérica. La diversidad de materias primas disponibles —cascarilla de arroz, bagazo de caña, podas urbanas, residuos de palma aceitera, pulpa de café— no representa una limitante, sino una oportunidad para producir biochars con perfiles de propiedades diferenciados y orientados a mercados específicos de alto valor agregado.

Modelamiento matemático como herramienta de diseño del biochar

El modelamiento matemático se ha convertido en una de las herramientas más importantes para comprender y optimizar los procesos de producción de biochar. Tradicionalmente, el desarrollo de nuevos materiales carbonosos se ha basado en campañas experimentales en las que se modifican variables como la temperatura de la pirólisis, la velocidad de calentamiento, el tiempo de residencia o el tipo de biomasa hasta encontrar las condiciones más adecuadas para una aplicación determinada. Aunque este enfoque sigue siendo indispensable, también implica altos costos experimentales y un tiempo considerable de investigación. En este contexto, la simulación computacional

permite reducir el número de experimentos necesarios y comprender con mayor profundidad los fenómenos que ocurren durante la conversión termoquímica de la biomasa (Vuppaladadiyam *et al.*, 2023).

Los modelos actuales describen de manera simultánea los fenómenos de transferencia de calor y de masa y las reacciones químicas responsables de la descomposición de la biomasa. A diferencia de los primeros modelos cinéticos globales, que representaban la pirólisis mediante unas pocas reacciones simplificadas, los desarrollos recientes incorporan mecanismos cinéticos mucho más detallados para la degradación de celulosa, hemicelulosa y lignina, junto con balances de energía y masa que permiten seguir la evolución de la temperatura, la liberación de compuestos volátiles y la formación del biochar dentro de la partícula. De esta manera, es posible evaluar el efecto del tamaño de la partícula, la composición de la biomasa y las condiciones de operación en el rendimiento y las características finales del material carbonoso (Li *et al.*, 2023; Vuppaladadiyam *et al.*, 2023).

Uno de los avances más importantes de los últimos años ha sido el desarrollo de modelos a escala de partícula que consideran la naturaleza anisotrópica de la biomasa. Debido a la disposición de sus fibras vegetales, propiedades como la conductividad térmica, la permeabilidad y la difusividad no son iguales en todas las direcciones. Como consecuencia, la distribución de temperatura, el transporte de los volátiles y la evolución de la porosidad cambian significativamente durante la pirólisis. Los modelos bidimensionales y tridimensionales desarrollados recientemente incorporan estos fenómenos, además de la contracción de la partícula y los cambios morfológicos que ocurren durante la conversión, logrando una representación mucho más realista del proceso y una mejor concordancia con los resultados experimentales (Caraccio *et al.*, 2026; Li *et al.*, 2023).

La simulación también ha evolucionado para integrar desde la escala de partícula hasta la escala de reactor mediante el uso de herramientas de dinámica de fluidos computacional (CFD). Estos modelos permiten estudiar simultáneamente la conversión de las partículas y el comportamiento del flujo gaseoso, facilitando el diseño y escalamiento de reactores de pirólisis. Gracias a ello es posible optimizar aspectos como la transferencia de calor, los tiempos de residencia y la distribución de temperatura, variables que influyen directamente en el rendimiento del biochar y en el desarrollo de su estructura interna (Caraccio *et al.*, 2026; Li *et al.*, 2023).

Recientemente, la inteligencia artificial ha comenzado a complementar los modelos fenomenológicos tradicionales. Algoritmos de aprendizaje automático como el Random Forest, el Gradient Boosting, el XGBoost y las redes neuronales permiten predecir el rendimiento del biochar y algunas de sus propiedades utilizando como variables de entrada la composición de la biomasa y las condiciones de operación. Aunque estos modelos ofrecen una capacidad predictiva notable y reducen considerablemente los tiempos de cálculo, su desempeño depende de la calidad de las bases de datos empleadas durante el entrenamiento. Por esta razón, la tendencia actual consiste en combinar modelos mecánicos con técnicas de aprendizaje automático, aprovechando tanto el fundamento físico de los primeros como la rapidez computacional de los segundos (Divine *et al.*, 2024).

En conjunto, estos avances han cambiado la forma en que se aborda el desarrollo de los nuevos biochars. El modelamiento matemático ya no se utiliza únicamente para describir un proceso, sino también para orientar el diseño del material desde su etapa de síntesis. En este sentido, la integración entre experimentación, modelamiento y análisis de datos constituye uno de los pilares de la ingeniería de biochar y representa el camino para pasar de producir un material por ensayo y error a diseñarlo racionalmente en función de la aplicación que se desea.

Conclusiones

En el artículo mostramos cómo la composición de la biomasa agroindustrial y las condiciones de pirólisis determinan, de manera predecible, la estructura y el desempeño del biochar en sus distintas aplicaciones. El desempeño del biochar, un producto de valor agregado, no

se limita únicamente a su área superficial o porosidad, sino que también está influenciado por la naturaleza de los defectos, los sitios de borde, los heteroátomos incorporados (tales como nitrógeno, fósforo, azufre, boro, etc.) y la estructura electrónica local. En consecuencia, el concepto contemporáneo de “biochar diseñado” implica la concepción simultánea de la arquitectura de poros (micro, meso y macroporos), la química superficial, la densidad y el tipo de defectos, la funcionalización con heteroátomos y la organización estructural de los dominios aromáticos. Estos factores son los determinantes primarios del desempeño del biochar en aplicaciones como la captura de dióxido de carbono, la catálisis, el almacenamiento electroquímico de energía, la remediación ambiental y el mejoramiento de suelos. No obstante, persiste una comprensión limitada de la química superficial, los defectos y los sitios de borde, lo cual ha obstaculizado el diseño racional de enfoques de ingeniería orientados a la obtención de materiales carbonosos con una alta densidad de defectos o sitios activos de alto desempeño.

Estas capacidades técnicas del biochar diseñado adquieren pleno sentido como parte de estrategias energéticas más amplias. El suministro sostenible y confiable de energía constituye un componente fundamental del plan de acción conjunto de *One Health*, el cual aspira a un mundo mejor preparado para prevenir, predecir, detectar y responder ante amenazas para la salud, al tiempo que mejora la salud de los seres humanos, los animales, las plantas y el medio ambiente, contribuyendo simultáneamente al desarrollo sostenible. En este contexto, los países deben implementar una transición energética hacia un sistema energético asequible, confiable, seguro y sostenible mediante las siguientes acciones:

- Implementación de sistemas de generación distribuida en unidades residenciales, plazas de mercado, universidades y hospitales mediante el aprovechamiento de residuos domésticos y podas de árboles, entre otros.
- Inversión en el suministro de energías limpias en zonas no interconectadas o aisladas del sistema eléctrico, de acuerdo con los recursos disponibles.
- Inversión en energías renovables: solar, eólica, geotérmica, mareomotriz, así como las basadas en la biomasa y gradientes salinos.
- Implementación de prácticas de eficiencia energética, incluidas nuevas tecnologías e integración del calor, el frío y la energía eléctrica.
- Adopción de tecnologías e infraestructuras de energía limpia, integrando diferentes tecnologías para el aprovechamiento de residuos.
- Aprovechamiento de recursos propios con alta tecnología, incluidas la captura y el secuestro de carbono, para garantizar emisiones cero.
- Los empresarios pueden reducir la demanda interna de transporte priorizando las telecomunicaciones e incentivando modalidades de transporte que requieran menos energía, como el tren, en lugar del automóvil y el avión.

Información suplementaria

Ver la información suplementaria en <https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/4177/5437>

Contribución de los autores

FCh: concibió y supervisó el estudio; VSJ, RMM, JO, JCM, CAG: contribuyeron a la conceptualización, la revisión de la literatura y la discusión científica. Todos los autores participaron en la redacción, revisión crítica y edición del manuscrito, aprobaron la versión final y aceptan la responsabilidad por la integridad y el contenido del trabajo presentado.

Referencias

- Agegehu, G., Bass, A. M., Nelson, P. N., & Bird, M. I. (2016). Benefits of biochar, compost and biochar–compost for soil quality, maize yield and greenhouse gas emissions in a tropical agricultural soil. *Science of The Total Environment*, 543, 295-306. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.054>

- Correia, A.A.S. & Rasteiro, M.G. (2025); A Review of Persistent Soil Contaminants: Assessment and Remediation Strategies. *Environmental Science and Pollution Research*, 12, 229; <https://doi.org/10.3390/environments12070229>
- Boateng, A. A. (2020). *Pyrolysis of Biomass for Fuels and Chemicals*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-03824-4>
- Caraccio, R., Cipriano, E., Frassoldati, A., Faravelli, T. (2026). Multiphase modeling of anisotropic biomass particle pyrolysis accounting for particle deformation and coupled gas-phase dynamics. *Chemical Engineering Journal*, 531, 174297. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2026.174297>
- Chejne-Janna, F., García-Pérez, M., Noriega, M. del P. (2024). *Applications of Biomass-Derived Materials for Bioproducts and Bioenergy*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG.
- Cheng, F. & Li, X. (2018). Preparation and Application of Biochar-Based Catalysts for Biofuel Production. *Catalysts*, 8(9), 346. <https://doi.org/10.3390/catal8090346>
- Divine, D., Hubert, S., Epelle, E. I., Ojo, A. U., Adeleke, A. A., Ogbaga, C. C., Akande, O., Okoye, P. U., Giwa, A., Okolie, J. A. (2024). Enhancing biomass Pyrolysis: Predictive insights from process simulation integrated with interpretable Machine learning models. *Fuel*, 366, 131346. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131346>
- Córdoba-Ramírez, M., Chejne, F., Alean, J., Gómez, C.A., Navarro-Gil, A., Ábrego, J., Gea, G. (2024). Experimental strategy for the preparation of adsorbent materials from torrefied palm kernel shell oriented to CO₂ Capture. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 18765-18784. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32028-3>
- Granados, D.A., Basu, P., Nhuchhen, D.R., Chejne, F. (2019). Investigation into torrefaction kinetics of biomass and combustion behaviors of raw, torrefied and char samples, *Biofuels*, 12(6), 633-643. <https://doi.org/10.1080/17597269.2018.1558837>
- Enders, A., Hanley, K., Whitman, T., Joseph, S., & Lehmann, J. (2012). Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance. *Bioresource Technology*, 114, 644-653. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.03.022>
- FAO, UNEP, WHO, WOA. (2022). *One Health Joint Plan of Action (2022-2026). Working together for the health of humans, animals, plants and the environment*. FAO; UNEP; WHO; World Organisation for Animal Health (WOAH) (founded as OIE). <https://doi.org/10.4060/cc2289en>
- Hughes, J., Hart, A., Das, B., Wood, J. (2026); Advances in the Application of Low-Cost, Natural Materials, and Waste-Derived Catalysts for Catalytic Upgrading of Plastic and Biomass Pyrolysis Oil. *Energy Fuels*, 40, 2338-2371. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5c05623>
- Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas - IPSE. (2011a). *Centro de innovación tecnológica con énfasis en combustibles Líquidos y Gaseosos*. IPSE.
- Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas - IPSE. (2011b). *Centro de innovación tecnológica con énfasis en Gasificación*. IPSE. <https://repositoriobi.minminas.gov.co/handle/123456789/2452>
- Jain, A., Sarsaiya, S., Kumar Awasthi, M., Singh, R., Rajput, R., Mishra, U. C., Chen, J., Shi, J. (2022). Bioenergy and bio-products from bio-waste and its associated modern circular economy: Current research trends, challenges, and future outlooks. *Fuel*, 307, 121859. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121859>
- Ordonez-Loza, J., Bamdad, H., Spataro, S., Papari, P., Berruti, F. (2024). Self-Energized Pyrolysis Process for Sustainable Biochar Production. *Energy Fuels*, 38, 19598-19610.
- Jiang, L.-Q., Fang, Z., Zhao, Z.-L., Zheng, A.-Q., Wang, X.-B., Li, H.-B. (2019). Levoglucosan and its hydrolysates via fast pyrolysis of lignocellulose for microbial biofuels: A state-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 105, 215-229. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.055>
- Lawal, A.A., Ariffin, H., Ibrahim, I., Mohd Yusoff, M.Z., Zakaria, M.R., Hassan, M.A., Shirai, Y. (2027). Biochar nanopore structural formation from pyrolytic carbonization of lignocellulosic biomass – a review. *Biomass and Bioenergy*, 217, 109878. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2026.109878>
- Lee, J., Kim, K.-H., Kwon, E. E. (2017). Biochar as a Catalyst. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 70-79. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.002>
- Lefrançois, T., Malvy, D., Atlani-Duault, L., Benamouzig, D., Druais, P.-L., Yazdanpanah, Y., Delfraissy, J.-F., Lina, B. (2023). After 2 years of the COVID-19 pandemic, translating One Health into action is urgent. *The Lancet*, 401(10378), 789–794. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(22\)01840-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(22)01840-2)

- Li, F., Wu, K., Yang, K., Ge, Z., Feng, J., Zhang, H. (2023). A comprehensive pyrolysis model for lignocellulosic biomass particles with a special emphasis on the anisotropic characteristics. *Fuel*, 341, 127635. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127635>
- Li, Y., Xing, B., Ding, Y., Han, X., Wang, S. (2020). A critical review of the production and advanced utilization of biochar via selective pyrolysis of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 312, 123614. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123614>
- Okolie, J. A., Nanda, S., Dalai, A. K., Kozinski, J. A. (2021). Chemistry and Specialty Industrial Applications of Lignocellulosic Biomass. *Waste and Biomass Valorization*, 12(5), 2145-2169. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01123-0>
- Sakhiya, A.K., Anand, A., Kaushal, P. (2020). Production, activation, and applications of biochar in recent times. *Biochar*, 2, 253–285. <https://doi.org/10.1007/s42773-020-00047-1>
- Shao, Y., Li, C., Fan, M., Gao, G., Inkoua, S., Zhang, L., Zhang, S., Xiang, J., Hu, S., Hu, X. (2024). Sequential pyrolysis for understanding specific influence of cellulose- and lignin-derived volatiles on properties of counterpart char. *Green Chemical Engineering*, 5(2), 222-235. <https://doi.org/10.1016/j.gce.2023.04.004>
- Sierra-Jiménez, V., Mathews, J. P., Yoo, P., Budai, A., Chejne, F., Dufour, A., García-Pérez, M. (2024). Biochar data into structure: A methodology for generating large-scale atomistic representations. *Carbon*, 228, 119391. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2024.119391>
- Sohi, S., López-Capel, E., Krull, E., Bol, R. (2009). *Biochar, climate change and soil: a review to guide future research*. CSIRO. <https://doi.org/10.4225/08/58597219a199a>
- Spath, P. L. & Dayton, D. C. (2003). *Preliminary Screening -- Technical and Economic Assessment of Synthesis Gas to Fuels and Chemicals with Emphasis on the Potential for Biomass-Derived Syngas*. National Renewable Energy Laboratory. <https://doi.org/10.2172/15006100>
- UN. (2023). *The Sustainable Development Goals Report 2023: Special Edition*. <https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/>
- Vuppaladadiyam, A. K., Varsha Vuppaladadiyam, S. S., Sikarwar, V. S., Ahmad, E., Pant, K. K., S. M., Pandey, A., Bhattacharya, S., Sarmah, A., Leu, S.-Y. (2023). A critical review on biomass pyrolysis: Reaction mechanisms, process modelling and potential challenges. *Journal of the Energy Institute*, 108, 101236. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2023.101236>
- Werkelin, J., Skrifvars, B.-J., Zevenhoven, M., Holmbom, B., Hupa, M. (2010). Chemical forms of ash-forming elements in woody biomass fuels. *Fuel*, 89(2), 481-493. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.09.005>
- Werpy, T. & Petersen, G. (2004). *Top Value Added Chemicals from Biomass: Volume I -- Results of Screening for Potential Candidates from Sugars and Synthesis Gas*. National Renewable Energy Laboratory. <https://doi.org/10.2172/15008859>
- Wood, R., Mašek, O., Erastova, V. (2024a). Developing realistic molecular models of biochars. *Cell Reports Physical Science*, 5(7), 102037. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2024.102037>
- Wood, R., Mašek, O., Erastova, V. (2024b). Developing realistic molecular models of biochars. *Cell Reports Physical Science*, 5(7), 102037. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2024.102037>
- Yasir, M., Hossain, A., Pratap-Singh, A. (2025). Pesticide Degradation: Impacts on Soil Fertility and Nutrient Cycling. *Environmental Science and Pollution Research*, 12, 272; <https://doi.org/10.3390/environments12080272>
- Yuan, P., Wang, J., Pan, Y., Shen, B., Wu, C. (2019). Review of biochar for the management of contaminated soil: Preparation, application and prospect. *Science of The Total Environment*, 659, 473-490. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.400>
- Xiao, X., Chen, Z., Chen, B. (2016); H/C atomic ratio as a smart linkage between pyrolytic temperatures, aromatic clusters and sorption properties of biochars derived from diverse precursor materials. *Nature, Scientific Report*, 6, 22644. <https://doi.org/10.1038/srep22644>