



UNIVERSIDAD DE MEDELLIN

Aprovechamiento de los residuos agrícolas y su relación con la descontaminación de matrices ambientales

Gonzales Sulca, Alexandra 1^a, Horque Castro, Karina 2^a

Rubio-Clemente, Ainhoa^b

^a Estudiante de Ingeniería Ambiental, Trabajo de Grado, Universidad de Medellín, Medellín, Colombia

^b Profesor, Asesor del Trabajo de Grado, Programa de Ingeniería Ambiental, Universidad de Medellín, Medellín, Colombia

Resumen

Los desechos agrícolas se han convertido en una preocupación creciente en los últimos años ya que pueden causar importantes problemas ambientales; sin embargo, también se pueden valorizar siendo usados como materia prima para la producción de bioenergía. Esta revisión consiste en evaluar la capacidad de la biomasa para la generación de bioenergía a partir del aprovechamiento de los residuos agrícolas desde la información proporcionada en la literatura. En esta investigación se halló que en la actualidad existen diversas tecnologías para la generación de energía mediante la conversión o transformación de la biomasa, tanto de tipo bioquímico como Termoquímico. Cabe destacar que durante la transformación bioquímica de la biomasa se puede obtener lo que se conoce como biogás, cuyo poder calorífico puede ser aprovechado para la generación de electricidad. Por otro lado, en la conversión de la biomasa por procesos termoquímicos se puede generar un subproducto denominado biocarbón, el cual puede ser incorporado a otros ciclos de tratamiento como es la descontaminación de aguas, dadas sus características de formación de macro y microporos, presencia de grupos funcionales y área superficial que hacen del biocarbón un material alternativo con alta capacidad de adsorción de compuestos tóxicos contenidos en diferentes matrices ambientales. De esta manera, con este trabajo se pretende contribuir al desarrollo sostenible, al poder darle una segunda, tercera y cuarta vida a nuestros residuos.

Palabras clave: Residuos agrícolas, Bioenergía, Procesos termoquímicos, Procesos bioquímicos, Pirólisis, Biocarbón, Tratamiento de aguas residuales contaminadas, Economía circular.

1. Introducción

Actualmente, el incremento de la demanda y consumo energético, así como las dificultades que existen para satisfacer esta demanda con las fuentes de energía disponibles, están prefigurando un escenario de crisis energética global. A esto se suma la insuficiencia de recursos propios en cuanto a combustibles fósiles en los países, porque una gran parte de estos hidrocarburos son importados como el petróleo y el carbón que están distribuidos de manera desigual entre los países (Foster, 2020). Este hecho implica una gran dependencia de otros países importadores de este tipo de recursos, siendo a su vez las provisiones de este recurso limitadas (Bhattacharyya, 2009).

Para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), los países desarrollados y en vías de desarrollo han mostrado interés en el desarrollo y uso de energías renovables ya que podría ser una de las alternativas más favorables para reducir la contaminación de las matrices ambientales. Bajo este escenario, se hace necesario la exploración de diferentes fuentes energéticas alternativas y renovables.

Por este motivo, hoy en día, es de gran interés el aprovechamiento de residuos orgánicos para la obtención de bioenergía, lo cual contrarresta la contaminación ambiental, entendido como uno de los problemas de mayor impacto a nivel mundial (Mboumboue & Njomo, 2018).

Por otro lado, la agricultura es uno de los sectores productivos que más contribuye a las emisiones de GEI en el planeta (Shakoor et al., 2022). Adicionalmente, los residuos agrícolas constituyen actualmente uno de los serios problemas ambientales debido a que la cantidad de producción sigue aumentando proporcionalmente con el crecimiento demográfico. Numéricamente, la generación de residuos agrícolas a nivel mundial para el año 2016 se proyectó en 368,329,087,469 ton aproximadamente (Soto Gómez et al., 2019). De hecho, se dice que para el año 2050, la población mundial alcanzará los 9,500 millones, de modo que se requerirán más alimentos, recursos naturales y materias primas (Zabaniotou, 2018) para suplir todas las necesidades demandadas. Como resultado de ello, se generará un incremento de residuos o materiales que son descartados, dando lugar a efectos nocivos cuando estos no tienen una disposición adecuada.

Es de resaltar que, en varios países, la opción adoptada por parte de los agricultores es la quema descontrolada de los residuos agrícolas, ya que con esto se logra disminuir el volumen, despejando o limpiando la zona para el cultivo, lo que puede llegar a causar incendios de todo el predio (Comisión para la Cooperación Ambiental, 2014). Cabe recordar que la quema de biomasa, como madera, hojas, árboles y pastos, incluyendo los residuos agrícolas, produce el 40% de dióxido de carbono (CO_2), 32% del monóxido de carbono (CO), 20% del material particulado (PM, por sus siglas en inglés) y el 50% de los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) emitidos al ambiente a escala mundial (Comisión para la Cooperación Ambiental, 2014).

Por esta razón, y con el fin de reducir los impactos ambientales asociados, se pretende implementar tecnologías que permitan el aprovechamiento de los residuos agrícolas para la obtención de bioenergía y contribuir a la economía circular, ya que se estima que solo el 9% de la economía mundial puede clasificarse como circular (Vetroni et al., 2020). Cabe destacar que la bioenergía ofrece soluciones de gestión de residuos, lo cual se suma a la obtención de biocarbón durante la conversión termoquímica de la biomasa, que puede ser utilizado como enmendador de suelos, brindando un secuestro de carbono y mejorando la calidad del suelo ya que actúa como reservorio de larga duración de carbón y retarda su retorno a la atmósfera como CO_2 y, a la vez, contribuye a mitigar el cambio climático. Además, se da un cierre de ciclo en la agricultura, jugando un papel importante en la descarbonización para la generación de electricidad, ofreciendo una gran cantidad de beneficios como el aumento en la seguridad energética, el desarrollo rural y el aumento de ingresos familiares (Zabaniotou, 2018). Así mismo, el biocarbón puede utilizarse en la descontaminación de las diferentes matrices ambientales como es el recurso hídrico (Pan et al., 2021). Además, la obtención de bioenergía a partir del aprovechamiento de residuos

agropecuarios es un proceso económicamente viable y sustentable, siendo una nueva fuente de empleo que contribuye a potenciar la economía del país (Röder et al., 2020).

En este sentido, a los residuos agrícolas se pretende dar la valorización energética que consiste, precisamente, en la recuperación de la energía contenida en ellos, pero al mismo tiempo la disminución de su cantidad, volumen y peligrosidad (Orner et al., 2020). De forma alternativa, se pretende la obtención de subproductos como el biocarbón ya que este puede ser incorporado a otros ciclos, dando un riguroso manejo a los impactos ambientales derivados (Sayin et al., 2021).

El presente trabajo se establece con miras a dar a conocer la estrategia ideal para el aprovechamiento de residuos agrícolas, y así disminuir y mitigar la contaminación de las diferentes matrices ambientales con el fin de contribuir con la economía circular y, por ende, al desarrollo sostenible (Maíllo, 2021). Bajo este escenario, el potencial impacto de este estudio consiste en disminuir y mitigar los residuos agrícolas, aprovechándolos para la obtención de bioenergía y así dar una valorización adecuada a este tipo de residuos. El beneficio que se brindará sobre la propuesta de reducir la contaminación de matrices ambientales utilizando residuos agrícolas tendrá un impacto agregado en todo el ámbito de la agricultura, ya que está comprometida con el cuidado del ambiente. En este orden de ideas, la bioenergía permite abrir nuevos horizontes hacia la contribución de la economía circular y el desarrollo sostenible.

2. Bioenergía

La bioenergía es la energía derivada de los biocombustibles. Cabe destacar que un biocombustible es el combustible producido directa o indirectamente de la biomasa mediante procesos termoquímicos o procesos bioquímicos. Por su parte, la biomasa es el material de origen biológico (Ej., desechos agrícolas a base de cereales, madera, hojas, pastos, restos de diferentes variedades de frutas, estiércol o carbón vegetal), que no incluye el material integrado en formaciones geológicas o transformado en fósiles (FAO, 2021).

La biomasa está conformada de materia orgánica donde la energía se almacena en forma de componentes químicos, principalmente en carbono (C), oxígeno (O), hidrógeno (H), azufre (S) y nitrógeno (N), en escalas pequeñas. Las plantas, a través de la fotosíntesis, producen carbohidratos que forman los denominados bloques de construcción de la biomasa (Han et al., 2021). A lo largo del proceso de fotosíntesis, se capta el CO₂ y el vapor de agua (H₂O), el cual es activado gracias a la energía solar que permite la transformación en energía química en forma de azúcares, y esto da origen a las hemicelulosas, lignina, celulosas y almidones, etc. Por tanto, la biomasa es la fuente principal de materia orgánica obtenida a partir de las plantas (National Geographic, 2021). Las diferentes fuentes de biomasa como residuos agrícolas y forestales son las más relevantes para el aprovechamiento y producción energética.

En la actualidad, la biomasa aporta alrededor del 10% del suministro energético a nivel mundial (Popp et al., 2021). De la biomasa se pueden obtener tres tipos principales de productos energéticos: 1) biocombustibles para el sector de transporte, 2), materia prima para la producción de químicos, y 3) energía eléctrica y calor (Elgarahy et al., 2021). En los últimos años, se han desarrollado distintas tecnologías enfocadas principalmente en la mejora de la conversión de la biomasa en energía mediante la combustión directa, gasificación, pirólisis, digestión anaeróbica, etc. Ello permite plantear una gran cantidad de posibles aplicaciones entre las que destacan la producción de energía térmica, electricidad, biocombustibles y la generación de gases combustibles. Es de resaltar que los procesos de conversión de la biomasa se clasifican generalmente en termoquímicos y bioquímicos.

2.1. Procesos de conversión termoquímica

La conversión termoquímica de la biomasa es un término generalizado que se constituye como la tecnología más explorada y utilizada hoy en día. Esta conlleva ciertos procesos primordiales para la producción de energía como la combustión, gasificación y pirólisis. Todos estos procesos de conversión termoquímica se detallan en las siguientes secciones.

2.1.1. Combustión

La combustión se refiere a la quema de la biomasa en presencia del oxígeno molecular (O_2). La combustión se ha venido utilizando desde tiempos remotos. Para obtener la combustión de la biomasa, primero comprende de un proceso de quema de cualquier sustancia, ya sea sólida, líquida o gaseosa, dando lugar a una reacción química exotérmica (que genera calor) (Glushkov et al., 2021). Se puede realizar la quema de cualquier tipo de materia orgánica o biomasa, incluso con cierto contenido de humedad, siempre y cuando no supere el 50% en peso; en caso contrario, se debe disminuir el porcentaje de humedad mediante un secado de la biomasa (Ayala-Mendivil & Sandoval, 2018).

La combustión de biomasa se ha implementado desde tiempos atrás a una escala menor para usos domésticos con fines de cocinado de alimentos y calefacción. Esta combustión se denomina combustión directa, la cual es ineficiente porque durante el proceso de combustión se pierde entre un 30% y un 90% del poder calorífico de esta (Agencia Chilena de Eficiencia Energética, 2015).

En este sentido, actualmente, con el avance tecnológico se puede abordar de mejor manera la combustión de la biomasa, apostando por una escala mayor, la cual se puede llevar a cabo en calderas, turbogeneradoras y hornos, entre otros. De esta manera, será más eficiente y habrá un mejor aprovechamiento del poder calorífico contenido en la biomasa utilizada como materia prima en el proceso de combustión (European Environment Agency, 2021). Cabe resaltar que la combustión puede implementarse a escalas industriales en motores estacionarios, turbinas de gas y calderas. En estas últimas, se

consideran tres categorías de acuerdo a la potencia térmica nominal instalada (PTN), las cuales son las que se detallan a continuación (Inventarios Nacionales de Emisiones a la Atmósfera, 2012):

- Plantas de combustión con $300 \text{ MWt} > \text{PTN} \geq 50 \text{ MWt}$.
- Plantas de combustión con $\text{PTN} < 50 \text{ MWt}$.
- Plantas de combustión con $\text{PTN} \geq 300 \text{ MWt}$.

Se encuentra que existe una gran dificultad en obtener datos clasificados de acuerdo a las actividades de combustión, por la gran cantidad de instalaciones presentes (Inventarios Nacionales de Emisiones a la Atmósfera, 2012). Si bien, la combustión de la biomasa aporta significativamente al suministro de energía mundial, porque ha escalado a plantas industriales en un intervalo de 100 MW a 3000 MW (Climate Technology Centre & Network, 2017).

A pesar de la generación de energía asociada al proceso de combustión de la biomasa, la quema de esta produce humo, el cual contiene dióxido de azufre (SO_2) e hidrocarburos, dióxido de nitrógeno (NO_2) y partículas en suspensión, suponiendo todo un cóctel de agentes contaminantes emitidos al medio ambiente. Si bien, en comparación con los contaminantes generados durante el proceso de la combustión del carbón y combustibles fósiles, la carga contaminante asociada se estima en un 90% menor respecto de la obtenida con la combustión de la biomasa (Zhao et al., 2021).

Además, la combustión de la biomasa es un proceso de conversión prometedor, ya que en este se combina la alta eficiencia de conversión y transporte del carbón con reducción en la emisión de gases durante el proceso (Jin et al., 2018). Por otra parte, actualmente, con el avance tecnológico, las industrias siguen mejorando la eficiencia de las plantas de carbón (en términos de energía disponible en el combustible) un 33% de media y hasta un 49%, y continúan reduciendo las emisiones de GEI en un 3%. Para esto, se han venido realizando diversos estudios encaminados a optimizar la combustión del combustible transformando las plantas industriales de acuerdo a las propiedades de la materia prima que se queme (Richard Martin, 2016).

Así mismo, es de gran relevancia evaluar el potencial de la biomasa en la producción de energía eléctrica. Para ello, es necesario tener en cuenta las propiedades físicas y químicas como el poder calorífico, la densidad, la humedad y el contenido de carbono de la biomasa, entre otros factores, con el fin de definir el uso y la aplicación real que se le puede emplear a las diferentes categorías de biomasa (Caligiuri et al., 2021).

Cabe destacar que el poder calorífico de la biomasa residual agrícola está determinado por las características energéticas de esta, definido como la cantidad de energía (J) que va a ser

producida por kg de materia prima durante el proceso de combustión (Alhazmi & Loy, 2021). En la Tabla 1 se presenta el poder calorífico de diferentes tipos de biomasa, destacándose el de residuos agroindustriales y de madera, con un valor entre 12 MJ/kg y 18 MJ/kg; mientras que los pellets tienen un valor calorífico de 20 MJ/kg; por su parte, el carbón registra un valor calorífico de 28 MJ/kg. De esta manera, se denota que el carbón tiene un valor calorífico mucho mayor que las biomásas, pero la combustión de pellets posee la ventaja de reducir los GEI generados durante el proceso (Lucas et al, 2012).

Tabla 1. Poder calorífico de diferentes tipos de biomasa.

Biomasa	Poder calorífico MJ/kg
Residuos agroindustriales y de madera	12 MJ/kg y 18 MJ/kg
Pellets (aglomerado de restos de serrín)	20 MJ/kg
Carbón	28 MJ/kg

2.1.2. Gasificación

La gasificación es una combustión indirecta de materiales ricos en carbono (Safarian et al., 2019), incluyendo el coque (hulla), nafta, carbón, biomasa, en estados sólida o líquida, los cuales son sometidos a un proceso químico a alta temperatura (750°C - 900 °C), y son oxidados utilizando O₂ y vapor de agua, mediante la cual se obtiene el gas de síntesis que es un combustible gaseoso (Ardila, 2019). Por tanto, a través de este proceso de gasificación se pueden generar gases con un poder calorífico comprendido entre 4 MJ/m³ y 6 MJ/m³, los cuales pueden emplearse para la combustión directa como combustible para turbinas de gas y motores. Además, este gas de síntesis se puede utilizar como materia prima en la producción de otros productos químicos, como el amoníaco (NH₃), metano (CH₄), hidrógeno (H₂) e incluso del metanol (CH₃OH). Adicionalmente, también se puede realizar la transformación de la biomasa en biogasolina y biodiésel. Estos combustibles son la alternativa del futuro para hacer frente al efecto de los GEI y a la escasez de los combustibles fósiles. No obstante, debe tenerse en cuenta que ser calificados como alternativas renovables deben cumplir tres criterios primordiales, incluyendo la reducción de CO₂, disponibilidad en el mercado y tener un precio adecuado (Hodson et al., 2018).

Por otro lado, durante el proceso de gasificación de la biomasa, puede obtenerse un subproducto sólido carbonoso conocido como biocarbón.

2.1.3. Pirólisis

El pirólisis es un proceso donde se da la conversión termoquímica de la biomasa en tres productos (ruta clásica): residuo carbonoso (biocarbón), líquido (bioaceites), y gas

(biogás). Esto se produce mediante el calentamiento de la biomasa, a una temperatura alrededor de 500 °C, en ausencia de O₂. Este proceso puede ser modificado para priorizar la producción del carbón, gas y aceite con un rendimiento del 95% de eficiencia. Los tres productos anteriormente mencionados se producen durante el proceso de pirólisis y están sujetos a los ajustes de los parámetros, pudiendo variar su rendimiento.

Hay diferentes tipos de pirólisis dependiendo de la velocidad de calentamiento y el tiempo de residencia de la biomasa en los reactores, como son la pirólisis rápida, lenta o convencional e intermedia.

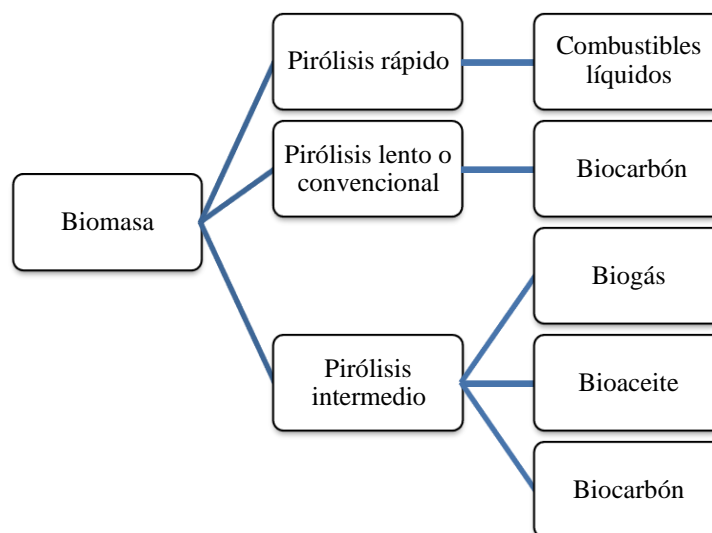
En el caso de la pirólisis rápida (Figura 1), la biomasa se calienta a 500 °C durante 1s, de la cual se obtiene un rendimiento de productos de 75% del líquido, 12% del sólido y 13% del gas. Este proceso resulta ambicioso para generar la producción de combustibles líquidos porque estos tienen un fácil almacenamiento y transporte (Ansari et al., 2021).

Por su parte, la pirólisis lenta o convencional (Figura 1), se lleva a cabo a una velocidad de calentamiento lenta, logrando una temperatura máxima en un rango de 500 °C-600 °C. Bajo estas condiciones se obtienen tres productos diferentes como líquidos, sólidos y gases, en cantidades significativas (Guin, 2018) (Figura 1). Estos tres productos se obtienen en proporciones semejantes (32-38 %w de sólido, 25-29 w% de gas y 28-32 %w de líquido) (Rosario, 2016). Así mismo, el biocarbón obtenido del pirólisis lento presenta alto contenido de carbono (53-96%) y altos valores caloríficos que oscilan entre 20 y 36 MJ/kg (Gürel et al., 2022).

En relación al pirólisis intermedio (Figura 1), varios autores han demostrado que este proceso opera a una temperatura comprendida entre 400 y 500°C, con tiempos de residencia de 10 a 20 s (Ochoa, 2018). En el pirólisis intermedio, los rendimientos de los tres productos tanto sólidos, gaseoso y líquido se ven afectados por factores como la composición química de la biomasa, presión, velocidad de calentamiento, temperatura y el tamaño de la partícula. Adicionalmente, se ve influenciado por el tamaño de las partículas de la materia prima utilizada, ya que, al incrementar el tamaño de las partículas, provocará una disminución en la velocidad de transferencia de calor, lo que implica un aumento en el rendimiento de biocarbón y, de esta manera, disminuye el rendimiento de biogás y el bioaceite producido. Las partículas más pequeñas contrarrestan las restricciones internas de la transferencia de calor y presenta una alta eficiencia en la producción del bioaceite (Cobo Diego, 2012). Cabe destacar que este tipo de pirólisis produce biogás y biocarbón, pero en menores cantidades; si bien, el rendimiento del biogás depende del rendimiento del biocarbón, porque a medida que disminuye la producción de biocarbón aumentará la del biogás (Hornung, 2013).

Es de señalar que, actualmente, el pirólisis intermedio ha alcanzado un éxito comercial para la producción de sustancias químicas y para producir biocombustibles líquidos avanzados (Afanasjeva et al., 2018)

Figura 1. Aplicación del proceso termoquímico en la biomasa mediante la pirólisis rápida, lenta o convencional e intermedia para obtención de los productos bioenergéticos.



2.1.4. Torrefacción

La torrefacción consiste en el calentamiento lento de la biomasa a una temperatura de 300 °C bajo una atmósfera inerte. Este proceso permite mejorar las propiedades de la biomasa como combustible (Feng et al., 2022). De este proceso, se obtiene un producto sólido uniforme que retiene aproximadamente el 70% del peso inicial y entre el 80 y el 90% con bajo contenido de humedad y alto poder calorífico comparado con la biomasa inicial (Tito, 2009).

2.1.5. Otros procesos

Carbonización hidrotermal (Hydrothermal carbonization)

Es un proceso químico que transforma la biomasa húmeda que no ha sido tratada en las últimas 12 h en un material llamado hidrochar o hidrocarbón (Lancha et al., 2021). Este tratamiento hidrotérmico (HTU, por sus siglas en inglés) posee grandes ventajas en la conversión de la biomasa, porque esta demanda de una energía menor para el proceso de secado; a su vez, esta conversión es muy eficiente y la temperatura se mantiene relativamente baja. El proceso HTU funciona con las biomásas que contengan un alto porcentaje de humedad, las cuales son sometidas a alta presión con unas temperaturas que oscilan entre 180 y 250 °C. De este proceso, se obtiene vapor de agua, aproximadamente, entre 15 y 20 bar. Todo esto se basa en un proceso exotérmico. Diversos estudios y

experimentos han demostrado que el consumo de energía demandado para mantener la temperatura del reactor durante el proceso de carbonización es mucho menor debido al calor emitido por el reactor en el transcurso del proceso exotérmico. Así mismo, estas investigaciones evidencian la generación de un 70% y 80 % del carbón de entrada en fase sólida, entre un 15% y un 20% del producto en fase líquida y el 5% restante será convertido en gas, principalmente, CO₂ (Güleç et al., 2021).

Este proceso es una tecnología prometedora para la conversión de residuos agrícolas con alto contenido en agua, pero también puede ser importante para la captura de CO₂. Esta tecnología se ha estado desarrollando solo a nivel de planta piloto, tras la revisión de distintos estudios de investigación y experimentación sobre este proceso. En este sentido, es relevante tenerlo en cuenta y aplicarlo a una escala industrial para la producción de productos químicos, agrícolas, farmacéuticos, y energías renovables. Diversas investigaciones deducen una estimación viable económicamente, por su eficiencia las cuales han sido medidos con parámetros como la demanda eléctrica y energía térmica específica (Mario Honrubia, 2020).

Licuefacción (*hydrothermal liquefaction*)

El proceso de licuefacción hidrotérmica (LHT) consiste en la conversión termoquímica de la biomasa en presencia de agua, a temperaturas y presiones de moderadas a elevadas de hidrógeno (250 - 400 °C, 5 - 20 MPa), en hidrocarburos líquidos y estables a un tiempo de reacción de 10 a 60 min cercanas al punto crítico del agua. El interés asociado a la licuefacción es bajo debido a la baja eficiencia, siendo este proceso recomendado sólo para plantas de pequeña y mediana escala. Así mismo, los reactores y sistemas de alimentación de combustibles son muy complejos y económicamente menos rentables que los procesos de pirólisis (Mahima et al., 2021).

2.2. Procesos de conversión bioquímica

Esta conversión abarca la utilización de microorganismos para convertir la biomasa en energía útil, mediante las rutas de digestión anaerobia y fermentación de productos alcohólicos. A continuación, se hace énfasis en la digestión anaerobia ya que producto de ello se obtiene el biogás, el cual puede utilizarse para generar electricidad y calor (Chakma et al., 2015).

2.2.1. Digestión anaerobia

La biomasa procedente de residuos agrícolas contiene alta cantidad de nutrientes, los cuales están compuestos de lípidos, proteínas y carbohidratos. La manera más eficaz de aprovechar estos compuestos es mediante la digestión anaerobia de estos residuos agrícolas para la obtención del biogás. Durante este proceso, se produce principalmente la

conversión bioquímica de azúcares como la hexosa a una mezcla de CH₄ y CO₂. Este proceso se lleva a cabo mediante cuatro etapas diferentes las cuales son: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. En estas etapas ocurre la actividad microbiana de manera secuencial (Lee et al., 2019).

En la primera etapa de la digestión anaerobia se da la hidrólisis, donde los microorganismos convierten los compuestos complejos en pequeños componentes solubles al romper sus enlaces químicos. En este proceso, los carbohidratos complejos se transforman en azúcares simples. Por su parte, las proteínas se transforman en péptidos, y éstos se transforman en aminoácidos. Adicionalmente, los lípidos complejos se transforman en ácidos grasos. En la segunda etapa ocurre la acidogénesis; en la cual se da la degradación de los productos obtenidos de la etapa anterior, los cuales constituyen la materia prima de esta fase. Estos componentes son transformados a través del metabolismo de microorganismos anaerobios a CO₂, H₂, ácidos orgánicos, alcoholes, nitrógeno orgánico y algunos compuestos de azufre (S). En la tercera etapa, se produce la acetogénesis. Durante esta fase, varios ácidos y alcoholes se degradan a acetato, los cuales son utilizados como sustratos por las bacterias formadoras de CH₄. Cabe destacar que, si en este cultivo también se hallan las bacterias fermentativas, el acetato se puede transformar directamente a CO₂ y H₂. Finalmente, en la cuarta etapa ocurre la metanogénesis, en la cual el CH₄ se genera a partir del acetato, CO₂ y H₂ (Chakma et al., 2015). El biogás está compuesto por 65% CH₄, 32% CO₂, 2% H₂ y el balance N₂. También se pueden encontrar algunas trazas de H₂, S, CO, dependiendo de las condiciones de la digestión y el sustrato empleado. El biogás posee un contenido energético del 20-40% (Calbry Muzyka et al., 2022).

A continuación (ver Tabla 2), se muestran los estudios realizados a diferentes tipos de biomásas mediante la aplicación de la hidrólisis para evaluar sus respectivos rendimientos en azúcares.

Tabla 2. Rendimiento de la producción de azúcares fermentables mediante la aplicación de catalizadores para su posterior implementación en la producción de biocombustibles.

Materia orgánica	Catalizador	Metodología	Generación de Glucosa	Referencias
Residuos forestales (astillas, pellets, leña, tronco)	Enzimas hidrolíticas de <i>Celluclast 1.5 L</i> (<i>Novozyme</i>)	Termo-físico	55%	(Ayala Mendivil & Sandoval, 2018)
Residuos del tallo de algodón lignocelulosa	Enzimas hidrolíticas de <i>Trichoderma reesei</i>	Bioquímico	178 mg /g	(Malik et al., 2020)
Residuos agroindustriales de la paja de arroz	Enzimas hidrolíticas de <i>Trichoderma reesei Rut C-30</i> (ATCC 56765)	Bioquímico	1% -1,5%	(Alejandro Colina et al., 2009)
Residuos agroindustriales (Salvado de trigo, bagazo de caña, paja de trigo, y pulpa de remolacha)	Enzimas hidrolíticas de <i>Trichoderma reesei LM-UC4</i> y <i>Aspergillus nigerQM329</i>	Bioquímico	46%	(Dawson & Boopathy, 2008)

3. Antecedentes y casos de estudio

El incremento de la población en el mundo resulta, automáticamente, en el mayor uso de recursos energéticos no renovables, que ayudan a satisfacer necesidades emergentes. En este sentido, distintos países se ven obligados a iniciar un proceso de búsqueda para hallar un nuevo recurso energético sostenible (Osinergmin, 2017).

Dado el consumo excesivo de combustibles fósiles, constantemente surgen conflictos a raíz del calentamiento global, puesto que ocasiona cambios climáticos a nivel mundial. Este fenómeno viene azotando al planeta desde la revolución industrial, debido al incremento de los GEI (Loera, 2019) y, por supuesto, a la actividad humana.

Bajo el escenario descrito previamente, los jefes de estado y de gobierno de diferentes países, empresas y representantes de la sociedad civil anunciaron en la sede de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en Nueva York pasos de gran alcance potencial para enfrentar el cambio climático (Gross, 2019), entre los cuales destaca lograr la neutralidad de carbono para el 2050.

Existe una gran necesidad obligatoria de una solución energética limpia y sostenible. La consecución del objetivo basado en la producción de energía renovable sostenible puede defenderse mediante el uso pertinente de la bioenergía, a través del aprovechamiento de los residuos agrícolas, puesto que, actualmente, el mundo viene atravesando una crisis sanitaria debido a la pandemia asociada a la COVID-19 (SARS-CoV-2), la cual ha

desencadenado múltiples desequilibrios en todas las naciones, principalmente en las actividades humanas y el crecimiento económico (ONU, 2020). De igual manera, este virus ha afectado seriamente al sector agrícola, principalmente en la escasez de mano de obra, ocasionando que los agricultores no puedan cosechar a tiempo. A esto se suma el bloqueo de las rutas de transporte de suministro de alimentos frescos debido a la cuarentena total, lo cual implica un incremento en las tasas de pérdida y desperdicios de hortalizas en todo el país.

Si bien, es posible sacar provecho de la crisis, ya que muchos de los residuos agrícolas pueden considerarse potencialmente como recursos beneficiosos, siempre y cuando se gestionen de forma sostenible en la producción de la bioenergía. Para ello, se ha llevado a cabo una exploración de diferentes estudios reportados en la literatura sobre el aprovechamiento de los residuos agrícolas para la producción de bioenergía.

En el estudio realizado por el Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal en el año 2019, se basaron en temas de residuos agrícolas, que hoy en día es un área prometedora y alternativa para la producción de bioenergía (biocombustibles, gas, etc.), en los países de regiones tropicales y subtropicales en vía de desarrollo (Sanabria, 2018). En esta investigación utilizaron dos de los principales residuos agrícolas, en especial el raquis y bananos verdes, las cuales se probaron en reactores de tanque agitados a pequeñas escalas (CSTR), a condiciones mesófilas entre 35 y 38 °C. Así mismo, también se verificaron las reacciones de las codigestiones de sustratos (plátano, raquis y suero). De esta manera, observaron el comportamiento de los ácidos grasos volátiles y la cantidad de carbonato inorgánico total generado bajo diferentes combinaciones de los sustratos. Este experimento lo realizaron a escala de laboratorio a una temperatura de 36 °C, con el fin de determinar el potencial máximo de estos sustratos en la producción de biogás. Como resultado, los autores obtuvieron que el raquis y el banano verde son sustratos idóneos para la producción de biogás, puesto que en los experimentos por lotes se obtuvo un rendimiento promedio de gas de 0,422 m³ kg⁻¹ de sólidos volátiles (SV) con 62,69% de CH₄ para el raquis, y 0,343 m³ kg⁻¹ SV con 61,46% de CH₄ para los bananos verdes.

Por otro lado, se destaca el estudio realizado en el 2020 por el Departamento de Química Agroambiental y Nutrición Vegetal de la Facultad de Agrobiología y Recursos Naturales, Universidad Checa de Ciencias de la Vida (Tlustoř et al., 2020). En este estudio, los autores realizaron un estudio sobre los efectos de la densidad y las partes de la planta de maíz para ensilaje en la producción y composición del biogás. La mayor consistencia de plantas de maíz tal vez implicaría un mejor rendimiento de la biomasa; sin embargo, el efecto sobre la productividad y calidad del biogás no se ha investigado de manera profunda. Por ello, en este estudio se realizó la comparación de dos densidades de plantas diferentes, en específico la mazorca de maíz y el rastrojo (90 000 y 130 000 plantas h⁻¹) (Tlustoř, 2020), con el fin de verificar los efectos relacionados al rendimiento y la producción del biogás. Este experimento se evaluó en pruebas por lotes, en las cuales se

obtuvo mayor rendimiento de CH₄ en el biogás de las mazorcas, en comparación con el obtenido del rastrojo. Por último, los autores concluyeron que una mayor densidad de plantas apoyó una dinámica más rápida del rendimiento de biogás específico de mazorcas y una mayor degradación de SV de las mismas.

En la investigación realizada por el Instituto de Tecnología, Cátedra de Ingeniería de Biosistemas, Universidad de Ciencias de la Vida de Estonia en el 2019, liderada por Kikas y colaboradores (Kikas et al., 2019), se enfatiza en el potencial de los residuos agrícolas a base de cereales disponibles para la producción de bioenergía. En este estudio, los autores utilizaron una serie de herramientas basadas en Excel de residuos agrícolas de la ONU para la Alimentación y la Agricultura (FAO), en las cuales le proporcionaron el potencial de biomasa de 294 países a nivel mundial (Rocha et al., 2019), para verificar y clasificar conforme al potencial de residuos agrícolas de cereales que poseen, y estimar su potencial de producción de bioenergía. Los autores utilizaron nueve desechos agrícolas de cereales (cebada, trigo, mijo, avena, arroz y paja de centeno, paja/tallo de sorgo y mazorca de maíz). Los resultados que obtuvieron están categorizados de acuerdo a la mejor disponibilidad que se encuentra en la región, para incrementar la producción de energía de la biomasa tal como se observa en la Tabla 3.

Tabla 3. Clasificación de países de Sudamérica en las regiones templadas/mesotérmicas con más potencial disponible (de desechos agrícolas a base de cereales) para producción de bioenergía (t/ha).

América	Paja/Tallo de sorgo	Paja de arroz	Paja de mijo	Paja de cebada	Paja de avena	Mazorca de maíz	Paja de centeno	Paja de trigo
Perú	6,48	7,26	-	1,37	1,18	0,75	1,16	1,36
Argentina	8,33	6,56	2,99	3,32	1,99	1,65	1,81	2,64
Colombia	7	4,44	-	1,92	1,44	0,69	-	1,67
Chile	-	5,4	2,99	5,17	4,82	2,64	4,83	4,8
Paraguay	6,6	4,6	-	-	-	0,77	-	2,18
Uruguay	7,55	7,68	-	2,77	1,92	1,1	-	2,88
Brasil	4,44	4,36	-	2,9	2,02	1,04	1,56	2,22
Venezuela	3,83	4,87	-	-	-	0,86	-	1,11
Ecuador	2,85	4,09	-	0,69	0,83	0,61	0,77	0,8
Bolivia	5,69	2,39	-	87	1,01	0,63	1,11	1,11
Guayana	-	4,38	-	-	-	0,34	-	-
Surinam	0	4,19	-	-	-	0,6	-	-

Fuente: clasificación climática A de Koppen-Geiger.

En la Escuela de Ingeniería Química y de Materiales de la Universidad Nacional de Ciencias y Tecnología, Islamabad, Pakistán en el 2020, se llevó a cabo una evaluación sobre la potencia bioenergética de los residuos agroindustriales, en la cual investigaron el comportamiento termo-cinético en un proceso de pirólisis lento (Chen et al., 2020). En este estudio, utilizaron 5 residuos industriales (cáscara de arroz, bagazo, mazorca de maíz,

paja de trigo y astillas de madera) de origen paquistaní, los cuales fueron degradados de manera térmicamente anaerobia, bajo una velocidad de calentamiento constante de $5\text{ }^{\circ}\text{C m}^{-1}$ (Raza et al., 2020). Luego, para el proceso cinético de la pirolisis, utilizaron el método de Coats-Redfern en 5 mecanismos de reacción, donde observaron que la mazorca de maíz presentó una degradación a temperaturas inferiores, a comparación de los otros residuos agroindustriales. Una vez que obtuvieron los parámetros cinéticos de los desechos agrícolas, con la implementación del método de Coats-Redfern, los autores referidos procedieron a tasar el comportamiento termodinámico de estos residuos agroindustriales y, seguidamente, la procedieron a realizar la clasificación en temas de prioridad de acuerdo a la disposición ascendente de la energía de activación de cada residuo evaluado.

Del proceso del uso de la biomasa para la obtención de bioenergía por medio de procesos termoquímicos, como son el pirólisis, carbonización hidrotermal, gasificación y torrefacción, se produce un residuo sólido conocido como biocarbón, cuyas propiedades fisicoquímicas pueden ser aprovechadas para el tratamiento de aguas contaminadas. Estudios realizados por Présiga y colaboradores (2020), abordaron los beneficios del biocarbón como una alternativa para el tratamiento de aguas residuales contaminadas. En este estudio se enfatizó que el biocarbón posee características como un alto índice de carbono recalcitrante y de nutrientes (P, Ca, Mg, K, S, etc.), y un pH regularmente alcalino. Asimismo, se destacó que los biocarbones presentan elevada área superficial porque son materiales poco densos y porosos, lo que les permite retener agua y nutrientes. En consecuencia, el biocarbón se convierte en un uso alternativo con alta capacidad de adsorción, remoción de compuestos tóxicos presentes en las aguas residuales contaminadas. Adicionalmente, se acentuaron las ventajas que posee el uso del biocarbón, por su rentabilidad, bajos costos económicos, facilidad operacional y mantenimiento del sistema (Présiga et al., 2020).

Otros estudios realizados por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México, se han enfocado en el aprovechamiento de los residuos de la materia orgánica mediante la digestión anaeróbica, puesto que es una tecnología de gran interés para el enfoque de la economía circular ya que combina el tratamiento de residuos de alta carga orgánica con la producción de vectores energéticos.

La biometanización de residuos agrícolas por medio de la digestión anaerobia se lleva a cabo mediante la acción de microorganismos metanogénicos en ausencia de O_2 . A partir de este proceso se origina una mezcla de gases compuestos, principalmente, por CH_4 y CO_2 conocido como biogás. Además, aparecen otros elementos traza, los cuales deben ser eliminados de la mezcla con el fin de aumentar las posibilidades de aprovechamiento. En este sentido, tiene lugar la purificación del biogás hasta obtener un gas con un contenido mayor a 97,3% de CH_4 . Este gas puede ser inyectado a la red de gas natural o ser empleado en la generación eléctrica (Morero & Campanella, 2013). A través de esta digestión anaerobia, además del biogás, se obtienen otros productos energéticos,

dependiendo del tipo de residuos empleados (ver Tabla 4). De la información compilada en la tabla, puede concluirse que los residuos alimentarios son una de las fuentes más importantes que pueden ser utilizadas para el aprovechamiento energético (Dhanya et al., 2020).

Tabla 4. Aprovechamiento de la materia orgánica para la producción de bioenergía.

<i>Materia orgánica</i>	<i>Clasificación de residuos</i>		<i>Pretratamiento</i>	<i>Producto final Bioenergía</i>
Residuos agroindustriales	Residuos agropecuarios	Salvado de trigo, bagazo de caña, paja de trigo, avena, cebada, coronta y paja de maíz.	hidrólisis ácida y fermentación.	Bioetanol
	Residuos de frutas	Fibras de tallos, cáscaras, semillas, pulpas de remolacha, manzana, naranja, melocotón, granada, caña de azúcar, piña, hueso de dátiles, etc.	Hidrólisis enzimática y fermentación	Bioetanol
Estiércol de animales	Heces y orines de purines, gallinaza, vacas, toros y bueyes, caballos, etc.		Metanización o Digestión anaeróbica	Biogás Subproducto, (abono y fertilizantes)
Residuos agroalimentarios	Industria láctea (suero de queso), desechos de un matadero (restos de animales marinos y terrestres como, rumen, restos de carne y grasas).		Hidrólisis enzimática, fermentación y transesterificación	Biodiesel Biohidrógeno biobutanol

Fuente:(Dhanya et al., 2020)

El origen de los residuos agrícolas utilizados también puede interferir en su aprovechamiento y, por tanto, en la eficiencia de la digestión anaerobia. Por ejemplo, si presentan un gran tamaño de partícula, la biomasa dispondrá de un mayor tiempo para su descomposición, lo que significa un mayor tiempo de retención hidráulica (TRH) (Dhanya et al., 2020). Así mismo, las condiciones de operación del proceso de digestión anaerobia también son de suma importancia, ya que la temperatura debe localizarse en torno a los 35 °C y el pH entre 6,6 y 7,6, siendo este valor con el que se puede obtener la máxima cantidad de biogás y con el mayor porcentaje de CH₄. Por otro lado, para que se lleve a cabo este proceso, es indispensable el suministro adecuado de una fuente de carbono (C) y de nutrientes como fósforo (P), azufre (S), nitrógeno (N), y sales minerales. Adicionalmente, se debe llevar un constante seguimiento para evitar la posible presencia de sustancias tóxicas que puedan impedir el desarrollo de las bacterias metanogénicas, lo cual da lugar a un bajo rendimiento del proceso (Cerdeja-Mejía, 2016).

En la Tabla 5, se muestran los rendimientos de CH₄ que se han obtenido de la digestión anaeróbica de diferentes residuos y clasificados en dos grupos diferentes. Grupo I, el cual está constituido por los residuos de frutas, verduras, flores, residuos de productos lácteos y

residuos mezclados. Por su parte, el Grupo II está conformado por los residuos de azúcar, cárnicos, residuos mezclados (Alkanok et al., 2014).

Con el fin de evitar las limitaciones asociadas a la alta heterogeneidad de los residuos agrícolas, se ha empezado a implementar la co-digestión, la cual consiste en combinar varias mezclas de sustratos orgánicos biodegradables que sirven como activadores o aditivos que mejoran la actividad enzimática de los microorganismos (Zhao et al., 2016). A modo de ejemplo, el uso de cáscaras de melón permite disminuir la concentración de SV y aumentar la producción de CH₄. De esta manera, se minimiza el THR (Matheri et al., 2017).

Tabla 5. Generación de CH₄ para el Reactor discontinuo del Grupo I y el Reactor discontinuo Grupo II

Sustratos empleados	Reactores Discontinuos de biomasa	Concentración de sólidos totales (ST)	Generación CH₄ (L de CH₄/g sólidos volátiles (SV)
Grupo I			
Residuos de frutas, hortalizas y flores (FVFW)	R1- R2	5%	0,4
Residuos de la Industria láctea (DPW)	R3-R4	5%	0,35
Mezcla heterogénea de los residuos (Mix.W)	R5-R6	5%	0,41
Grupo II			
Residuos de glucosa (SW)	R1 -R2	5%	0,3
Residuos cárnicos de animales marinos y Terrestres (MW)	R3-R4	5%	0,25
Mezcla heterogénea de los residuos (Mix.W)	R5 -R6	8%	0,4
Residuos Mixtos (Mix. W): FVFW +DPW+SW+MW.			
Reactores Discontinuos: (R1, R2, R3, R4, R5, R6).			
Clasificación de residuos en:			
Grupo I: Residuos de frutas, hortalizas, flores, restos de la Industria láctea, y mezcla heterogénea de estos residuos.			

Grupo II: Residuos de azúcar, cárnicos, residuos mezclados.

Fuente: (Alkanok et al., 2014).

3. Biocarbón

Cabe mencionar, como se ha indicado anteriormente, que, durante la producción de la biomasa por procesos fisicoquímicos, puede generarse un producto conocido como biocarbón. Este subproducto, hoy en día, es de gran interés por su composición y versatilidad para el tratamiento de diferentes matrices ambientales, como son las aguas contaminadas, lo que hace que sea diferente al carbón usado como combustible y al carbón activado (Dunnigan et al., 2018).

3.1. Origen y concepto de biocarbón

El biocarbón tuvo su origen en las antiguas poblaciones amerindias de la región amazónica, conocida como Terra Preta de Indio, donde por primera vez se creó la tierra oscura mediante las técnicas de slash-and-char (Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.), 2015). Dicha investigación estuvo enfocada en los suelos de Terra Preta (Antrosoles Hórticos) en la Amazonia y reveló los efectos del biocarbón en la funcionalización de los suelos. Principalmente, debido a que el biocarbón es conocido como una excelente enmienda del suelo para la fertilidad y sostenibilidad del suelo, en todo el mundo una gran cantidad de investigadores y agricultores están prestando atención a sus propiedades ocultas (Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.), 2015).

El biochar o biocarbón tiene diferentes definiciones así como Shackley y otros autores definieron de manera descriptiva como *“el sólido carbonoso poroso producido por la conversión termoquímica de materiales orgánicos en una atmósfera empobrecida en oxígeno que tiene propiedades fisicoquímicas adecuadas para el almacenamiento seguro y a largo plazo de carbono en el medio ambiente”* (Shackley et al., 2012). Verheijen y otros autores definieron como *“Biomasa que ha sido pirolizada en un ambiente con cero o bajo oxígeno aplicada al suelo en un sitio específico que se espera que capture C de manera sostenible y al mismo tiempo mejore las funciones del suelo bajo el manejo actual y futuro, evitando al mismo tiempo efectos perjudiciales a corto y largo plazo para el entorno más amplio. medio ambiente, así como la salud humana y animal”* (Verheijen, 2010). La International Biochar Initiative (IBI) define como *“un material sólido obtenido de la conversión termoquímica de biomasa en un ambiente limitado en oxígeno”* (Wilson & Reed, 2012). Todas las anteriores definiciones están relacionadas directamente con la producción de biocarbón y su aplicación al suelo y al agua.

3.2. Generación del biocarbón

El biocarbón se genera mediante el proceso de pirólisis, entre otros procesos de conversión termoquímica de la biomasa. Cabe destacar que una gran cantidad de estudios indican que se puede obtener biocarbón a partir de diferentes tipos de biomasa lignocelulósica como la cáscara de arroz (Asadi et al., 2021), el tallo de yuca y el rizoma (Wijitkosum, 2018), el bagazo de caña de azúcar (Matos et al., 2021), la mazorca de maíz (X. Liu et al., 2014), siendo este uso no solo es beneficioso sino también económico. Dentro de estos beneficios, se incluyen principalmente la producción de energía y la mitigación del cambio climático (Barrow, 2012).

Las técnicas termoquímicas comúnmente utilizadas para la producción de biocarbón incluyen pirólisis, carbonización hidrotermal, gasificación carbonización instantánea y torrefacción (Yaashikaa et al., 2020), siendo el pirólisis la técnica más estudiada y discutida en el pasado reciente. Esta se caracteriza por ser un proceso termoquímico en el que la biomasa se degrada térmicamente en sus constituyentes químicos bajo una atmósfera inerte o con una cantidad de O₂ estequiométrico muy bajo. Los diferentes tipos de pirólisis (lenta, intermedia y rápida), que dependen de las condiciones de funcionamiento tienen sus ventajas y limitaciones, y estos varían de acuerdo al producto deseado. El tipo de pirólisis más utilizado es la pirólisis lenta y rápida, la lenta que se enfoca en la en la producción de biocarbón y emplea velocidades de calentamiento bajas y tiempos de residencia prolongados, en donde la biomasa se piroliza hasta una temperatura del orden de 400 a 500 °C con una velocidad de calentamiento de aproximadamente 0,1 a 1 °C/s durante un tiempo que varía entre 5 y 30 min (Tripathi et al., 2016). Por su parte, la pirólisis rápido está fundamentalmente enfocada en la producción de biocombustible y gas de síntesis, utilizando altas temperaturas por encima de 700 °C y altas velocidades de calentamiento superiores a 300 °C/s (Matos et al., 2021; Mohanty et al., 2013).

La producción del biocarbón a partir de residuos agrícolas no dependen solo de la técnica que se emplea, sino también de los parámetros del proceso involucrados en la producción. Como se ha indicado anteriormente, algunos estudios sobre el pirólisis de biomasa mencionan que la producción del biocarbón depende de varios factores como las propiedades de la biomasa (tipo de biomasa, contenido de humedad y tamaño de partícula), condiciones de reacción (temperatura de reacción, tiempo de reacción, velocidad de calentamiento), entorno circundante (tipo de gas portador, caudal del gas portador) y otros factores (catalizador, tipo de reactor) (Tripathi et al., 2016). Además de ello, se encontró que las propiedades del biocarbón varían de acuerdo a las condiciones de proceso como temperatura, tiempo de residencia, velocidad de calentamiento, tamaño de partícula entre otros (Tripathi et al., 2016).

Para las reacciones de pirólisis de biomasa procedente de residuos agrícolas se aplican diferentes diseños y tecnologías de reactores, incluidos los reactores de lechos fijos, lechos fluidizados, lechos de chorro, reactores de cono rotatorio, reactores ablativos, reactores de horno rotatorio, reactores de tornillo sin fin, reactores de tubo descendente, reactores de

microondas, reactores de vacío, reactores de plasma y reactores de punto Curie (Soria-Verdugo et al., 2020). El rendimiento del biocarbón durante el proceso de pirólisis depende del tipo y la naturaleza de la biomasa (residuos agrícolas) utilizado, además el factor que decide fundamentalmente la eficiencia del producto final es la temperatura (Wei et al., 2019).

En las siguientes secciones se muestran algunos estudios en los que se indica la cantidad de biocarbón generado durante el proceso de pirólisis, condiciones de operación pirolíticas bajo las cuales se obtuvieron el biocarbón.

En el estudio realizado en la Universidad de Sungkyunkwan-Corea se produjo biocarbón a partir de Geodae-Uksae (*Miscanthus gigante*) mediante el pirólisis lento utilizando un reactor de lecho compacto a escala de laboratorio en un rango de temperatura de 300 a 700 °C con una velocidad de calentamiento de 10 °C/min, en donde se produjo biocarbón en un 27% en peso que contenía aproximadamente un 48% de biomasa, esto con la finalidad de mejorar la calidad del suelo y secuestrar CO₂ (Lee et al., 2013).

Debido a que el biocarbón tiene aplicaciones multidimensionales como para mitigar las emisiones de GEI, mejorar la salud del suelo y el tratamiento de aguas residuales, se encontró un estudio de producción y caracterización de biocarbón producido a partir de pirólisis lenta de tallo de gandul y bambú realizado por Sagarika Sahoo y colaboradores a diferentes temperaturas de pirólisis (400, 500 y 600 °C) durante un tiempo de mantenimiento de 1 h donde se encontró que el rendimiento de biocarbón fue mayor con el bambú que con la biomasa del tallo del gandul. Esto fue debido a que contiene mayor contenido de lignina y poca materia volátil. Por ende, el biocarbón resultó con mayor fracción de masa de C en un rango de 76,17 a 88,43% (Sahoo et al., 2021).

En el estudio de producción y caracterización de biocarbón de pirólisis lenta a partir de vinaza digerida rica en lignina realizado por Stef Ghysels y colaboradores mencionan que la vinaza digerida rica en lignina constituye una buena materia prima para la producción de biocarbón mediante pirólisis lenta de donde se puede obtener biocarbón con un rendimiento del 50,7%, una relación H/C de 0,70 y una relación O/C de 0,20, a 384 °C. Además, los referidos autores mencionan que el biocarbón producido presenta una alta recuperación de cenizas (93,08% de promedio) y un contenido de C estable (Ghysels et al., 2019).

4.3. Características fisicoquímicas del biocarbón

El IBI (2015) menciona que el biocarbón es un espectro de materiales y sus características dependen de sus constituyentes y producción. Para medir la calidad del biocarbón, se identificaron varias propiedades físicas como el pH, contenido de compuestos volátiles, capacidad de retención de agua, contenido de cenizas, densidad aparente, volumen de poros y el área de superficie específica (Brewer et al., 2014). Las características de la biomasa (residuos agrícolas) y los parámetros de producción son los que determinan las propiedades

fisicoquímicas del biocarbón como la distribución del tamaño de partículas, la porosidad, la capacidad de adsorción, la disposición estructural, el área superficial y la carga, así como los grupos funcionales que presenta (Xie et al., 2015).

Para la caracterización del biocarbón se pueden utilizar diferentes técnicas modernas como microscopía electrónica de barrido (SEM), espectrómetro infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR), análisis termogravimétrico (TGA), difracción de rayos X (XRD), Brunauer Emmett Teller (BET), nuclear Resonancia magnética (RMN), espectroscopia Raman, etc (Sohi et al., 2010).

Debido a sus grandes ventajas y su naturaleza ecológica, el biocarbón se ha utilizado para resolver una gran cantidad de problemas medioambientales, como la absorción de contaminantes en el suelo (Saravanan et al., 2018), la reducción de las emisiones de GEI, el tratamiento de aguas residuales, en la remediación del suelo (Matovic, 2011).

4. Usos del biocarbón. Caso específico del tratamiento de aguas contaminadas

El biocarbón se puede utilizar como adsorbente para el tratamiento de aguas residuales y como enmienda del suelo para mejorar la fertilidad ya que este actúa como sumidero del dióxido de carbono de la atmosfera, aparte de ello ayuda a retener N, S P, Ca y materia orgánica en el suelo. Por otro lado, el biocarbón no solo mejora las propiedades fisicoquímicas del suelo, sino también las propiedades microbianas del suelo. El uso del biocarbón en el suelo podría mejorar la estructura del suelo, aumentar su porosidad, disminuir la densidad aparente y mejorar la agregación y la retención de agua (Thangalazhy-Gopakumar et al., 2015).

El biocarbón ofrece una alternativa significativa y potencial para la adsorción de los contaminantes orgánicos, debido a que tiene excelentes propiedades adsorbentes, como su riqueza en grupos funcionales, estructuras de poros desarrolladas, áreas superficiales específicas relativamente altas y superficies hidrófobas (Kah et al., 2017).

Particularmente, en lo que se refiere al uso del biocarbón en el tratamiento de aguas contaminadas, puede indicarse que es una tecnología de tratamiento relativamente reciente, ya que comúnmente se hacía uso del carbón activado como un adsorbente universal para el tratamiento del agua (Mohan et al., 2014). A pesar de que el biocarbón es ideal para eliminar los contaminantes del agua, también tiene una gran ventaja aparte de ser sostenible es menos costosa, puede tener la capacidad de absorber hidrocarburos, otros compuestos orgánicos y algunos iones metálicos inorgánicos. Adicionalmente, el biocarbón podría reemplazar a los carbones activados a base de carbón, cáscara de coco y madera como adsorbente de bajo costo para contaminantes y patógenos; también podría usarse para eliminar contaminantes del agua mientras se carga con nutrientes para su uso posterior como enmienda de las características del suelo, proporcionando simultáneamente una capacidad de adsorción a largo plazo y un fertilizante (Mohan et al., 2014).

A continuación, se muestran estudios específicos en los que se hace el uso del biocarbón para la remoción de contaminantes de las aguas (ver Tabla 6).

Tabla 6. Estudios del uso del biocarbón en la descontaminación del agua.

Materia prima de biomasa	Temperatura pirólítica (° C)	Tiempo de residencia	Técnica de Pirólisis	Contaminante	Referencias
Fibra de coco	250-600	1 hora	Pirólisis lento	Cromo	(Tan et al., 2015)
Paja de maíz	600	2 horas	Pirólisis lento	Cobre y zinc	(X. Chen et al., 2011)
Caña gigante	300-600	2 horas	Pirólisis lento	Antibiótico sulfametoxazol	(Zhang et al., 2013), (P. Zhang et al., 2013), (W. Zhang et al., 2013), (Z. bin Zhang et al., 2013)
Pasto	200 - 600	1 hora	Pirólisis lento	Herbicidas fluorados	(Sun et al., 2011)
Piel de naranja	400-700	2 horas	Pirólisis lento	Fluoruro	(Oh et al., 2012)
Piel de naranja	300-700	6 horas	Pirólisis lento	Compuestos orgánicos hidrofóbicos (HOC)	(Z. Chen et al., 2012a)
Piel de naranja	150-700	6 horas	Pirólisis lento	Naftaleno y 1-naftol	(B. Chen & Chen, 2009)
Cáscaras de maní	300-700	3 horas	Pirólisis lento	Tricloroetileno	(Ahmad et al., 2012a)
Cáscara de arroz	300	20 min	Carbonización hidrotermal (HTC)	Plomo	(Z. Liu & Zhang, 2009)
Cáscara de arroz	350	4 horas	Pirólisis lento	Pb, Cu, Zn y Cd	(Xu et al., 2013)
Paja de arroz	100-700	6 horas	Pirólisis lento	Aluminio	(Qian & Chen, 2013)
Rastrojo de soya	300- 700	3 horas	Pirólisis lento	Tricloroetileno	(Ahmad et al., 2012b)
Bagazo de caña de azúcar	450-600	---	Pirólisis lento	Sulfametoxazol	(Z. Chen et al., 2012b)
Bagazo de caña de azúcar	300-700	6 horas	Pirólisis lento	Compuestos orgánicos hidrofóbicos (HOC)	(Z. Chen et al., 2012b)
Residuos agroindustriales	400-800	1h	Pirólisis lento	Verde malaquita	(Présiga López et al., 2020)

5. Conclusiones y perspectivas futuras

La bioenergía puede constituirse como un tipo de energía renovable con bajas emisiones de carbono, lo cual supone numerosos beneficios ambientales y socioeconómicos, aparte de respaldar los objetivos de cambio climático global. Existen muchos estudios que muestran los beneficios de la bioenergía, pero los resultados a menudo están sujetos a variaciones e incertidumbres. Además, es importante considerar varios aspectos sostenibles de los sistemas de bioenergía más allá de los relacionados con el carbono.

Abordar la bioenergía dentro del sector energético no solo garantizará la producción y suministro sostenibles de biomasa, sino también aplicaciones limpias con bajo impacto en la salud y vectores de energía justos y equitativos. Se debe asegurar que la bioenergía proporcione las reducciones de emisiones de GEI necesarias. Además, se debe tener en cuenta que se necesitan enfoques específicos y de largo plazo para comprender las sinergias y las compensaciones de la bioenergía y los sistemas agrícolas.

Se debe considerar la evaluación más amplia de los impactos ambientales y la sostenibilidad de la bioenergía en el contexto del sistema del que forma parte, ya que toda la cadena de suministro, así como las partes interesadas, los impulsores, los desafíos directos e indirectos pueden tener efectos directos sobre el medio ambiente, la economía, y la sociedad.

Muchos estudios indican que la sociedad a nivel mundial puede beneficiarse de la producción de bioenergía en términos de economía y beneficios ambientales. Los resultados indican que la electricidad basada en pirólisis domina la electricidad convencional, además de ello la mitigación del cambio climático podría ser eficaz si la bioenergía basada en pirólisis a gran escala es adoptada.

Por otro lado, se ha evidenciado que el uso del biocarbón beneficia al suelo, aumentando su fertilidad. Adicionalmente, se ha reportado que el biocarbón tiene un alto potencial para secuestrar carbono en el suelo, reduciendo el cambio climático. Finalmente, se ha visto que el biocarbón puede utilizarse en la descontaminación de diferentes matrices ambientales, particularmente en la descontaminación del recurso hídrico.

Todas las investigaciones realizadas sobre la aplicación de biocarbón en el agua llegaron a la misma conclusión de que el biocarbón puede ser un adsorbente novedoso y factible, aparte de ser beneficioso desde la perspectiva ambiental y económica.

Agradecimientos

No hay palabras para expresar el profundo respeto y agradecimiento a la Dra. Ainhoa Rubio Clemente por haber aceptado ser nuestra directora de Trabajo de Grado, gracias por la confianza depositada, por la paciencia, dedicación, apoyo moral, por los consejos, aportación de conocimiento, pero sobre todo el invaluable tiempo dedicado a nosotras y al presente documento.

También queremos agradecer a nuestras familias: a nuestros padres por su apoyo incondicional, nunca nos han fallado; a nuestros hermanos que siempre han estado dispuesto a aconsejarnos y ayudarnos, han sido nuestra verdadera motivación para terminar este trabajo. A todos ellos siempre estaremos muy agradecidas.

Referencias

- Afanasjeva, N., Castillo, L. C., & Sinisterra, J. C. (2018). Biomasa lignocelulósica. Parte II: Tendencias en el pirólisis de biomasa. *J. Sci. Technol. Appl*, 5, 4–22. <https://doi.org/10.34294/j.jsta.18.5.31>
- Agencia Chilena de Eficiencia Energética. (2015). *Guía para la calificación de consultores en eficiencia energética*.
- Ahmad, M., Lee, S. S., Dou, X., Mohan, D., Sung, J. K., Yang, J. E., & Ok, Y. S. (2012a). Effects of pyrolysis temperature on soybean stover- and peanut shell-derived biochar properties and TCE adsorption in water. *Bioresource Technology*, 118, 536–544. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2012.05.042>
- Ahmad, M., Lee, S. S., Dou, X., Mohan, D., Sung, J. K., Yang, J. E., & Ok, Y. S. (2012b). Effects of pyrolysis temperature on soybean stover- and peanut shell-derived biochar properties and TCE adsorption in water. *Bioresource Technology*, 118, 536–544. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2012.05.042>.
- Alejandro Colina, Alexis Ferrer, & Lauris Urribarrí. (2009). *Producción de celulasas por Trichoderma reesei Rut C-30 en diferentes substratos celulósicos*. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-07702009000200008
- Alhazmi, H., & Loy, A. C. M. (2021). A review on environmental assessment of conversion of agriculture waste to bio-energy via different thermochemical routes: Current and future trends. In *Bioresource Technology Reports* (Vol. 14). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100682>.
- Alkanok, G., Demirel, B., & Onay, T. T. (2014). Determination of biogas generation potential as a renewable energy source from supermarket wastes. *Waste Management*, 34(1), 134–140. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.09.015>
- Ansari, K. B., Kamal, B., Beg, S., Wakeel Khan, M. A., Khan, M. S., al Mesfer, M. K., & Danish, M. (2021). Recent developments in investigating reaction chemistry and transport effects in biomass fast pyrolysis: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 150). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111454>.
- Ardila, M. (2019). *Modelo cinetico para el proceso de gasificacion de briquetas de carbon con biomasa en reactor de lecho fijo*.
- Asadi, H., Ghorbani, M., Rezaei-Rashti, M., Abrishamkesh, S., Amirahmadi, E., Chengrong, C., & Gorji, M. (2021). Application of Rice Husk Biochar for Achieving Sustainable Agriculture and Environment. *Rice Science*, 28(4), 325–343. <https://doi.org/10.1016/J.RSCI.2021.05.004>

- Ayala Mendivil, N., & Sandoval, G. (2018). Bioenergy from forest and wood residues. *Madera y Bosques*, 24(Special Issue). <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401877>
- Barrow, C. J. (2012). Biochar: Potential for countering land degradation and for improving agriculture. *Applied Geography*, 34, 21–28. <https://doi.org/10.1016/J.APGEOG.2011.09.008>
- Bhattacharyya, S. C. (2009). Fossil-fuel dependence and vulnerability of electricity generation: Case of selected European countries. *Energy Policy*, 37(6), 2411–2420. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.02.031>
- Brewer, C. E., Chuang, V. J., Masiello, C. A., Gonnermann, H., Gao, X., Dugan, B., Driver, L. E., Panzacchi, P., Zygourakis, K., & Davies, C. A. (2014). New approaches to measuring biochar density and porosity. *Biomass and Bioenergy*, 66, 176–185. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2014.03.059>
- Calbry Muzyka, A., Madi, H., Rüscher Pfund, F., Gandiglio, M., & Biollaz, S. (2022). Biogas composition from agricultural sources and organic fraction of municipal solid waste. *Renewable Energy*, 181, 1000–1007. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2021.09.100>
- Caligiuri, C., Renzi, M., Antolini, D., Patuzzi, F., & Baratieri, M. (2021). Diesel fuel substitution using forestry biomass producer gas: Effects of dual fuel combustion on performance and emissions of a micro-CHP system. *Journal of the Energy Institute*, 98, 334–345. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2021.07.010>
- Cerda-Mejía, L. (2016). Enzimas modificadoras de la pared celular vegetal. Celulasas de interés biotecnológico papelerero. www.tdx.cat
- Chakma, S., Ranjan, A., Choudhury, H. A., Dikshit, P. K., & Moholkar, V. S. (2015). Bioenergy from rice crop residues: role in developing economies. *Clean Technologies and Environmental Policy* 2015 18:2, 18(2), 373–394. <https://doi.org/10.1007/S10098-015-1051-5>
- Chen, B., & Chen, Z. (2009). Sorption of naphthalene and 1-naphthol by biochars of orange peels with different pyrolytic temperatures. *Chemosphere*, 76(1), 127–133. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2009.02.004>
- Chen, X., Chen, G., Chen, L., Chen, Y., Lehmann, J., McBride, M. B., & Hay, A. G. (2011). Adsorption of copper and zinc by biochars produced from pyrolysis of hardwood and corn straw in aqueous solution. *Bioresour. Technol.*, 102(19), 8877–8884. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2011.06.078>
- Chen, Z., Chen, B., Zhou, D., & Chen, W. (2012a). Bbsolute sorption and thermodynamic behavior of organic pollutants to biomass-derived biochars at two pyrolytic

- temperatures. *Environmental Science and Technology*, 46(22), 12476–12483. <https://doi.org/10.1021/ES303351E>
- Chen, T., Zhang, S., & Yuan, Z. (2020). Adoption of solid organic waste composting products: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 272, 122712. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122712>
- Climate Technology Centre & Network. (2017). *Biomass combustion and co-firing for electricity and heat*. <https://www.ctc-n.org/technologies/biomass-combustion-and-co-firing-electricity-and-heat>
- Cobo Diego. (2012). *Pirólisis de residuos de cosecha de caña de azúcar (rac) como alternativa de aprovechamiento en procesos de cogeneración*.
- Comisión para la Cooperación Ambiental. (Enero de 2014). *cec.org*. Obtenido de <http://www3.cec.org/islandora/es/item/11405-la-quema-de-residuos-agr-colas-esuna-fuente-de-dioxinas-es.pdf>
- Dawson, L., & Boopathy, R. (2008). Cellulosic ethanol production from sugarcane bagasse without enzymatic saccharification. In *BioResources* (Vol. 3, Issue 2).
- Dhanya, B. S., Mishra, A., Chandel, A. K., & Verma, M. L. (2020). Development of sustainable approaches for converting the organic waste to bioenergy. *Science of the Total Environment*, 723, 138109. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138109>
- Dunnigan, L., Morton, B., Ashman, P., Zhang, X., & Kwong, C., (2018). Características de emisión de un sistema de pirólisis-combustión para la coproducción de biocarbón y bioenergía a partir de desechos agrícolas Academia de Ciencias- China. Obtenido de <https://www-sciencedirectcom.dbcientificas.udem.edu.co/science/article/pii/S0956053X18302757>
- Elgarahy, A. M., Hammad, A., El-Sherif, D. M., Abouzid, M., Gaballah, M. S., & Elwakeel, K. Z. (2021). Thermochemical conversion strategies of biomass to biofuels, techno-economic and bibliometric analysis: A conceptual review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(6), 106503. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106503>
- European Environment Agency. (2021). *utilisation of calorific value — European Environment Agency*. <https://www.eea.europa.eu/help/glossary/gemet-environmental-thesaurus/utilisation-of-calorific-value>
- Foster S, E. D. (2020). El papel de los combustibles fósiles en un sistema energético sostenible | Naciones Unidas. <https://www.un.org/es/chronicle/article/el-papel-delos-combustibles-fosiles-en-un-sistema-energetico-sostenible>

- F. Verheijen, S. J. A. C. B. M. van der V. I. D. (2010). *Biochar application to soils*. <https://doi.org/10.2788/472>
- FAO. (2021). *Bioenergía | Energía | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*. <https://www.fao.org/energy/bioenergy/es/>
- Feng, Y., Qiu, K., Zhang, Z., Li, C., Rahman, Md. M., & Cai, J. (2022). Distributed activation energy model for lignocellulosic biomass torrefaction kinetics with combined heating program. *Energy*, 239, 122228. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122228>
- Gross, D. (23 de septiembre de 2019). Los compromisos de América Latina y el mundo en la Cumbre sobre la Acción Climática. Noticias ONU, págs. 1-1.
- Ghysels, S., Ronsse, F., Dickinson, D., & Prins, W. (2019). Production and characterization of slow pyrolysis biochar from lignin-rich digested stillage from lignocellulosic ethanol production. *Biomass and Bioenergy*, 122, 349–360. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.040>
- Glushkov, D. O., Nyashina, G. S., Anand, R., & Strizhak, P. A. (2021). Composition of gas produced from the direct combustion and pyrolysis of biomass. *Process Safety and Environmental Protection*, 156, 43–56. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.09.039>
- Guin, Lee. (2018). *Estudio de los procesos de pirólisis, gasificación de residuos agrícolas de henequen*.
- Güleç, F., Riesco, L. M. G., Williams, O., Kostas, E. T., Samson, A., & Lester, E. (2021). Hydrothermal conversion of different lignocellulosic biomass feedstocks – Effect of the process conditions on hydrochar structures. *Fuel*, 302, 121166. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2021.121166>
- Gürel, K., Magalhães, D., & Kazanç, F. (2022). The effect of torrefaction, slow, and fast pyrolysis on the single particle combustion of agricultural biomass and lignite coal at high heating rates. *Fuel*, 308, 122054. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122054>
- Han, W., Chang, J., Jiang, H., Niu, S., Liu, Y., Xu, J., Wu, J., & Ge, Y. (2021). Plant species diversity affects plant nutrient pools by affecting plant biomass and nutrient concentrations in high-nitrogen ecosystems. *Basic and Applied Ecology*, 56, 213–225. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2021.08.002>
- Hodson, E. L., Brown, M., Cohen, S., Showalter, S., Wise, M., Wood, F., Caron, J., Feijoo, F., Iyer, G., & Cleary, K. (2018). U.S. energy sector impacts of technology innovation, fuel price, and electric sector CO₂ policy: Results from the EMF 32 model

intercomparison study. *Energy Economics*, 73, 352–370. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.03.027>

Hornung, A. (2013). Intermediate pyrolysis of biomass. *Biomass Combustion Science, Technology and Engineering*, 172–186. <https://doi.org/10.1533/9780857097439.2.172>

Inventarios Nacionales de Emisiones a la Atmósfera. (2012). *Capítulo 3: Combustión Industrial*.

Jin, H., Luo, K., Stein, O., Watanabe, H., & Ku, X. (2018). Coal and Biomass Combustion. In *Journal of Combustion* (Vol. 2018). Hindawi Limited. <https://doi.org/10.1155/2018/9654923>

Kah, M., Sigmund, G., Xiao, F., & Hofmann, T. (2017). Sorption of ionizable and ionic organic compounds to biochar, activated carbon and other carbonaceous materials. *Water Research*, 124, 673–692. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2017.07.070>

Lancha, J. P., Colin, J., Almeida, G., Guerin, C., Casalinho, J., & Perré, P. (2021). A validated Distributed Activation Energy Model (DAEM) to predict the chemical degradation of biomass as a function of hydrothermal treatment conditions. *Bioresource Technology*, 341. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125831>

Lee, S. Y., Sankaran, R., Chew, K. W., Tan, C. H., Krishnamoorthy, R., Chu, D.-T., & Show, P.-L. (2019). Waste to bioenergy: a review on the recent conversion technologies. *BMC Energy* 2019 1:1, 1(1), 1–22. <https://doi.org/10.1186/S42500-019-0004-0004-0004>

Lee, Y., Eum, P. R. B., Ryu, C., Park, Y. K., Jung, J. H., & Hyun, S. (2013). Characteristics of biochar produced from slow pyrolysis of Geodae-Uksae 1. *Bioresource Technology*, 130, 345–350. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.12.012>

Liu, X., Ye, Y., Liu, Y., Zhang, A., Zhang, X., Li, L., Pan, G., Kibue, G. W., Zheng, J., & Zheng, J. (2014). Sustainable biochar effects for low carbon crop production: A 5-crop season field experiment on a low fertility soil from Central China. *Agricultural Systems*, 129, 22–29. <https://doi.org/10.1016/J.AGSY.2014.05.008>

Liu, Z., & Zhang, F. S. (2009). Removal of lead from water using biochars prepared from hydrothermal liquefaction of biomass. *Journal of Hazardous Materials*, 167(1–3), 933–939. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2009.01.085>

Loera, M. (2019). Calentamiento Global y Cambio Climático. Tesis Doctoral Universidad de Zaragoza., 1-416.

Malik, K., Salama, E. S., Kim, T. H., & Li, X. (2020). Enhanced ethanol production by *Saccharomyces cerevisiae* fermentation post acidic and alkali chemical pretreatments

of cotton stalk lignocellulose. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 147, 104869. <https://doi.org/10.1016/J.IBIOD.2019.104869>

Matheri, A. N., Ndiweni, S. N., Belaid, M., Muzenda, E., & Hubert, R. (2017). Optimising biogas production from anaerobic co-digestion of chicken manure and organic fraction of municipal solid waste. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 80, pp. 756–764). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.068>

Maíllo, A. (9 de febrero de 2021). La Biorrefinería circular biocarbon, una iniciativa de economía circular. URBASER, págs. 1-1.

Mahima, J., Sundaresh, R. K., Gopinath, K. P., Rajan, P. S. S., Arun, J., Kim, S. H., & Pugazhendhi, A. (2021). Effect of algae (*Scenedesmus obliquus*) biomass pre-treatment on bio-oil production in hydrothermal liquefaction (HTL): Biochar and aqueous phase utilization studies. *Science of the Total Environment*, 778. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146262>

Mario Honrubia. (2020). *La carbonización hidrotermal de biomasa y sus aplicaciones*. <https://www.ennomotive.com/es/carbonizacion-hidrotermal-biomasa>

Matos, T. T. S., Fornari, M. R., Mangrich, A. S., Schultz, J., Batista, E. M. C. C., Ribeiro, R. O. C., Romaõ, L. P. C., Yamamoto, C. I., Grasel, F. S., Bayer, C., Dieckow, J., & Bittencourt, J. D. A. (2021). Low temperature production of biochars from different biomasses: Effect of static and rotary lab reactors and application as soil conditioners. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105472. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2021.105472>

Matovic, D. (2011). Biochar as a viable carbon sequestration option: Global and Canadian perspective. *Energy*, 36(4), 2011–2016. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.09.031>

Mbouboué, E., & Njomo, D. (2018). Biomass resources assessment and bioenergy generation for a clean and sustainable development in Cameroon. *Biomass and Bioenergy*, 118, 16–23. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.08.002>

Mohan, D., Sarswat, A., Ok, Y. S., & Pittman, C. U. (2014). Organic and inorganic contaminants removal from water with biochar, a renewable, low cost and sustainable adsorbent – A critical review. *Bioresource Technology*, 160, 191–202. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2014.01.120>

Mohanty, P., Nanda, S., Pant, K. K., Naik, S., Kozinski, J. A., & Dalai, A. K. (2013). Evaluation of the physiochemical development of biochars obtained from pyrolysis of wheat straw, timothy grass and pinewood: Effects of heating rate. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 104, 485–493. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2013.05.022>

- Morero, B., & Campanella, E. A. (2013). Simulación del proceso de absorción química con soluciones de aminas para la purificación biogás. *Informacion Tecnologica*, 24(1), 25–32. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642013000100004>
- National Geographic. (2021). *biomass energy* | National Geographic Society. <https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/biomass-energy/>
- Ochoa, A. M. D. (2018). *Evaluación del proceso de pirólisis para la obtención de combustibles a partir de llantas usadas*.
- Orner, K. D., Camacho-Céspedes, F., Cunningham, J. A., & Mihelcic, J. R. (2020). Assessment of nutrient fluxes and recovery for a small-scale agricultural waste management system. *Journal of Environmental Management*, 267, 110626. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2020.110626>
- Okonkwo, U. C., Onokpite, E., & Onokwai, A. O. (2018). Comparative study of the optimal ratio of biogas production from various organic wastes and weeds for digester/restarted digester. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 30(2), 123–129. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2016.02.002>
- Oh, T.-K., Choi, B., Shinogi, Y., & Chikushi, J. (2012). Effect of pH Conditions on Actual and Apparent Fluoride Adsorption by Biochar in Aqueous Phase. *Water, Air, & Soil Pollution* 2012 223:7, 223(7), 3729–3738. <https://doi.org/10.1007/S11270-012-1144-2>
- Osinermin. (2017). *La industria de la energía renovable en el Perú: 10 años de contribuciones a la mitigación del cambio climático*. Lima: Gráfica Biblios S.A.
- Pan, X., Gu, Z., Chen, W., & Li, Q. (2021). Preparation of biochar and biochar composites and their application in a Fenton-like process for wastewater decontamination: A review. *Science of The Total Environment*, 754, 142104. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.142104>
- Présiga, D., Rubio, A., & Pérez, J. (2020). Uso del biocarbón como material alternativo para el tratamiento de aguas residuales contaminadas. *Revista UIS Ingenierías*, 1-14.
- Popp, J., Kovács, S., Oláh, J., Divéki, Z., & Balázs, E. (2021). Bioeconomy: Biomass and biomass-based energy supply and demand. *New Biotechnology*, 60, 76–84. <https://doi.org/10.1016/J.NBT.2020.10.004>
- Qian, L., & Chen, B. (2013). Dual Role of Biochars as Adsorbents for Aluminum: The Effects of Oxygen-Containing Organic Components and the Scattering of Silicate Particles. *Environmental Science and Technology*, 47(15), 8759–8768. <https://doi.org/10.1021/ES401756H>

- Raza, S., Atabani, A., Ammar, S., Nasir, S., Ali, I., & Chen, W. (2020). Evaluación del potencial bioenergético de residuos agroindustriales mediante la investigación del comportamiento termocinético en un proceso de pirólisis lento. *ELSEVIER*, 1-8.
- Richard Martin. (2016). *La industria sigue mejorando la eficiencia de las plantas de carbón en lugar de cerrarlas | MIT Technology Review*. <https://www.technologyreview.es/s/6066/la-industria-sigue-mejorando-la-eficiencia-de-las-plantas-de-carbon-en-lugar-de-cerrarlas>
- Röder, M., Mohr, A., & Liu, Y. (2020). Sustainable bioenergy solutions to enable development in low- and middle-income countries beyond technology and energy access. *Biomass and Bioenergy*, 143, 105876. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2020.105876>
- Rosario, M. y G. (2016). *Pirolisis a baja temperatura de la pomasa de manzana para la producción de biocombustibles*.
- Safarian, S., Unnpórrsson, R., & Richter, C. (2019). A review of biomass gasification modelling. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 110, pp. 378–391). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.003>
- Sahoo, S. S., Vijay, V. K., Chandra, R., & Kumar, H. (2021). Production and characterization of biochar produced from slow pyrolysis of pigeon pea stalk and bamboo. *Cleaner Engineering and Technology*, 3, 100101. <https://doi.org/10.1016/J.CLET.2021.100101>
- Saravanan, A., Kumar, P. S., & Renita, A. A. (2018). Hybrid synthesis of novel material through acid modification followed ultrasonication to improve adsorption capacity for zinc removal. *Journal of Cleaner Production*, 172, 92–105. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.10.109>
- Shackley, S., Carter, S., Knowles, T., Middelink, E., Haefele, S., Sohi, S., Cross, A., & Haszeldine, S. (2012). Sustainable gasification–biochar systems? A case-study of rice-husk gasification in Cambodia, Part I: Context, chemical properties, environmental and health and safety issues. *Energy Policy*, 42, 49–58. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2011.11.026>
- Shakoor, A., Dar, A. A., Arif, M. S., Farooq, T. H., Yasmeen, T., Shahzad, S. M., Tufail, M. A., Ahmed, W., Albasher, G., & Ashraf, M. (2022). Do soil conservation practices exceed their relevance as a countermeasure to greenhouse gases emissions and increase crop productivity in agriculture? *Science of the Total Environment*, 805. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150337>

- Sayin, F., Tunali Akar, S., & Akar, T. (2021). From green biowaste to water treatment applications: Utilization of modified new biochar for the efficient removal of ciprofloxacin. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 24, 2352–5541. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2021.100522>
- 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(1), 47–82. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)05002-9](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)05002-9)
- Soto Gómez, A., Toro Sánchez, J., & Matallana Pérez, J. (2019). *Urban, Agricultural and Livestock Residues in the Context of Biorefineries*.
- Soria-Verdugo, A., Rubio-Rubio, M., Goos, E., & Riedel, U. (2020). On the characteristic heating and pyrolysis time of thermally small biomass particles in a bubbling fluidized bed reactor. *Renewable Energy*, 160, 312–322. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2020.07.008>
- Sun, K., Keiluweit, M., Kleber, M., Pan, Z., & Xing, B. (2011). Sorption of fluorinated herbicides to plant biomass-derived biochars as a function of molecular structure. *Bioresource Technology*, 102(21), 9897–9903. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2011.08.036>
- Tan, X., Liu, Y., Zeng, G., Wang, X., Hu, X., Gu, Y., & Yang, Z. (2015). Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions. In *Chemosphere* (Vol. 125, pp. 70–85). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.12.058>
- Thangalazhy-Gopakumar, S., Al-Nadheri, W. M. A., Jegarajan, D., Sahu, J. N., Mubarak, N. M., & Nizamuddin, S. (2015). Utilization of palm oil sludge through pyrolysis for bio-oil and bio-char production. *Bioresource Technology*, 178, 65–69. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2014.09.068>
- Tito D, B. P. Z. R. (2009). Torrefacción de biomasa densificada. *Tecnología Química*, XXIX, 180–186. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445543761022>
- 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>
- Vetroni, M., Salvador, R., Carlos, A., & Moro, C. (Octubre de 2020). Mapeo de líneas de investigación sobre prácticas de economía circular en agricultura: de los residuos a la energía. *ScienceDirect*. Obtenido de [https://www-sciencedirectcom.dbcientificas.udem.edu.co/science/article/pii/S1364032120302495](https://www.sciencedirectcom.dbcientificas.udem.edu.co/science/article/pii/S1364032120302495)

- Wei, J., Tu, C., Yuan, G., Liu, Y., Bi, D., Xiao, L., Lu, J., Theng, B. K. G., Wang, H., Zhang, L., & Zhang, X. (2019). Assessing the effect of pyrolysis temperature on the molecular properties and copper sorption capacity of a halophyte biochar. *Environmental Pollution*, 251, 56–65. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2019.04.128>
- Wijitkosum, S. , S. T. (2018). *Increasing the amount of biomass in field crops for carbon sequestration and plant biomass enhancement using biochar*. https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=5zj8DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA35&ots=Z0Lgv_yKMX&sig=8L2_wkqPWqezW5WRUOgazsyBuG0&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Wilson, K., & Reed, D. (2012). *IBI White Paper-Implications and risks of potential dioxin presence in biochar-IBI White Paper Implications and Risks of Potential Dioxin Presence in Biochar*.
- Xie, T., Reddy, K. R., Wang, C., Yargicoglu, E., & Spokas, K. (2015). Characteristics and applications of biochar for environmental remediation: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45(9), 939–969. <https://doi.org/10.1080/10643389.2014.924180>
- Xu, X., Cao, X., & Zhao, L. (2013). Comparison of rice husk- and dairy manure-derived biochars for simultaneously removing heavy metals from aqueous solutions: Role of mineral components in biochars. *Chemosphere*, 92(8), 955–961. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2013.03.009>
- Yaashikaa, P. R., Kumar, P. S., Varjani, S., & Saravanan, A. (2020). A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy. *Biotechnology Reports*, 28, e00570. <https://doi.org/10.1016/J.BTRE.2020.E00570>
- Zabaniotou, A. (10 de Marzo de 2018). Rediseño de un sector de bioenergía en la UE en la transición a una bioeconomía circular basada en residuos: una revisión multidisciplinaria. ScienceDirect. Obtenido de <https://www-sciencedirectcom.dbcientificas.udem.edu.co/science/article/pii/S0959652617331438>
- Zhang, Z. bin, Cao, X. H., Liang, P., & Liu, Y. H. (2013). Adsorption of uranium from aqueous solution using biochar produced by hydrothermal carbonization. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 295(2), 1201–1208. <https://doi.org/10.1007/s10967-012-2017-2>
- Zhang, M., Gao, B., Yao, Y., & Inyang, M. (2013). Phosphate removal ability of biochar/MgAl-LDH ultra-fine composites prepared by liquid-phase deposition. *Chemosphere*, 92(8), 1042–1047. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.02.050>

- Zhang, P., Sun, H., Yu, L., & Sun, T. (2013). Adsorption and catalytic hydrolysis of carbaryl and atrazine on pig manure-derived biochars: Impact of structural properties of biochars. *Journal of Hazardous Materials*, 244–245, 217–224. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.11.046>
- Zhang, W., Mao, S., Chen, H., Huang, L., & Qiu, R. (2013). Pb (II) and Cr (VI) sorption by biochars pyrolyzed from the municipal wastewater sludge under different heating conditions. *Bioresource Technology*, 147, 545–552. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.08.082>
- Zhao, C., Yan, H., Liu, Y., Huang, Y., Zhang, R., Chen, C., & Liu, G. (2016). Bio-energy conversion performance, biodegradability, and kinetic analysis of different fruit residues during discontinuous anaerobic digestion. *Waste Management*, 52, 295–301. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2016.03.028>
- Zhao, R., Dai, R., Chen, T., Qin, J., Zhang, J., & Wu, J. (2021). Investigation on combustion, gaseous pollutants emission and ash characteristics during co-combustion of semicoke and coal slime. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106249>