

# Biocarbón como producto de la biomasa residual de palma de aceite en un concepto de economía circular



David Arturo Munar-Flórez  
Nidia Elizabeth Ramírez-Contreras  
Jesús Alberto García-Núñez

Boletín Técnico No. 41

Biocarbón como producto de la biomasa  
residual de palma de aceite en un concepto  
de economía circular

Centro de Investigación en Palma de Aceite - Cenipalma  
Bogotá, abril de 2022

## **Boletín Técnico No. 41**

### **Biocarbón como producto de la biomasa residual de palma de aceite en un concepto de economía circular**

Publicación del Centro de Investigación en Palma de Aceite, Cenipalma, cofinanciada por el Fondo de Fomento Palmero, administrado por Fedepalma.

Alexandre Patrick Cooman

**Director General**

#### **Autores**

David Arturo Munar-Flórez

Nidia Elizabeth Ramírez-Contreras

Jesús Alberto García-Núñez

#### **Coordinación editorial**

Yolanda Moreno M.

#### **Diagramación**

Fredy Johan Espitia Ballesteros

#### **Impresión**

Estudio 45-8 S.A.S.

#### **Cenipalma**

Calle 98 # 70-91. Piso 14

PBX: (57-601) 313 8600

[www.cenipalma.org](http://www.cenipalma.org)

Bogotá, D. C., Colombia

Abril de 2022

ISBN: 978-958-8360-91-1

## Presentación

El cambio climático pone retos al sector agropecuario mundial para lograr acciones que contribuyan a la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de sus sistemas productivos y así cumplir con los objetivos establecidos en el Acuerdo de París. Colombia ha trabajado en la reducción de las emisiones asociadas a la producción agrícola y al uso del suelo, promoviendo acuerdos que eviten la deforestación y minimicen el uso de combustibles fósiles. En años recientes, Colombia diseñó la “Estrategia 2050” que prevé que emerja como un país resiliente al clima con una economía sostenible y neutra en carbono. De igual forma, el Gobierno Nacional promueve el desarrollo de una bioeconomía sostenible como estrategia para el uso de los recursos del país, además de la reutilización de materiales (economía circular).

La implementación de la economía circular permite cumplir con la demanda de bienes y servicios de la población y promueve la creación de nuevos negocios basados en la eficiencia en el uso de materiales, agua y energía, teniendo en cuenta la capacidad de recuperación de los ecosistemas, el uso circular de los flujos de materiales y la extensión de la vida útil. En Colombia, una fuente renovable con aumento en el potencial de uso y aplicación de la economía circular es la biomasa residual agroindustrial, que puede ser retornada al suelo o usada para la producción de energía limpia, químicos y otros productos. Dentro de esta biomasa se destaca la generada en el proceso de extracción de aceite de palma, en el cual se producen aproximadamente 1,9 t de biomasa residual por cada tonelada de aceite de palma crudo. Del total de biomasa de palma producida, el 63 % de la tusa es dispuesta en campo, mientras que la fibra (80 %) y el cuesco (67 %) son utilizadas como combustible de calderas para la generación de vapor y energía en las plantas de beneficio. Sin embargo, el restante de biomasa, sólida y líquida, requiere un tratamiento para su uso posterior en la generación de nuevos productos a fin de dar valor adicional, contribuir a la reducción de las emisiones de GEI e incrementar los beneficios económicos del sector.

La agroindustria de la palma de aceite ha venido trabajando en modelos de producción sostenible, donde se destaca la obtención de energía renovable y el cierre de ciclos de materia y energía dentro de sus procesos. Además, en los últimos años, la agroindustria de la palma de aceite ha cambiado la percepción que se tiene de una planta de beneficio ya que no solo se extrae el aceite de palma, sino que también se pueden obtener productos a partir de biomasa. Dentro de las tecnologías emergentes

y más promisorias para estas biorrefinerías, está el proceso de pirólisis para obtención de biocarbón con diferentes usos comerciales, dentro de los que resaltan la mejora de suelos, el secuestro de carbono y la adsorción de contaminantes.

Este boletín es un insumo que contribuye al mejoramiento de la rentabilidad del sector palmero mediante la generación de nuevos productos a partir de biomasa, así como a la adopción de prácticas ambientales sostenibles para mitigar el cambio climático y mejorar la calidad de los suelos. En consecuencia, presenta aspectos técnicos que recogen la experiencia y el conocimiento de Cenipalma, además de otras entidades nacionales e internacionales, en lo relativo a la producción de biocarbón como una posibilidad de dar valor agregado a la biomasa residual de palma de aceite en Colombia.

Alexandre Patrick Cooman  
Director General

# Contenido

	Pág.
Introducción .....	7
Economía circular en la agroindustria de la palma de aceite.....	11
Biomasa de palma como precursor de biocarbón .....	17
Generalidades del biocarbón.....	23
¿Qué es biocarbón? .....	25
Pretratamiento físico de la biomasa.....	25
Procesamiento termoquímico de biomasa .....	26
Combustión directa.....	27
Gasificación .....	27
Procesamiento hidrotérmico .....	28
Hidrólisis química .....	29
Pirólisis .....	29
Reactores de pirólisis.....	31
Procesos de activación del biocarbón .....	33
Activación física .....	35
Activación química.....	36
Aplicaciones del biocarbón.....	39
Enmendedor de suelo.....	41
Adsorbente de contaminantes .....	42
Biocarbón como bioenergía.....	44
Soporte para catalizadores .....	45

Secuestrador de carbono .....	46
Otras aplicaciones .....	48
Biocarbón y el concepto de economía circular .....	51
Proveedores de tecnología para producción de biocarbón.....	57
Conclusiones y recomendaciones .....	62
Agradecimientos .....	64
Referencias.....	65

## Listado figuras

	Pág.
Figura 1. Beneficios sociales, económicos y ambientales del modelo de economía circular .....	9
Figura 2. Circularidad en la agroindustria de aceite de palma.....	17
Figura 3. Diagrama de operaciones del proceso de extracción de aceite de palma .....	21
Figura 4. Opciones termoquímicas para producir combustibles, químicos y energía.....	29
Figura 5. Pasos del proceso de gasificación térmica de biomasa.....	30
Figura 6. Fracción másica de los principales productos de la pirólisis.....	32
Figura 7. Diagrama del proceso de pirólisis .....	33
Figura 8. Diferentes tipos de reactores de pirólisis.....	34
Figura 9. Métodos de activación del biocarbón.....	37
Figura 10. Concepto de biorrefinería con secuestro de carbono.....	49
Figura 11. Principales aplicaciones del biocarbón que podrían ser implementadas con biomasa de palma de aceite .....	55

## Listado tablas

	Pág.
Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas de la biomasa de palma .....	23
Tabla 2. Principales parámetros de operación para proceso de pirólisis .....	32
Tabla 3. Relaciones H/C y O/C, indicadores del grado de aromaticidad, grado de carbonización y estabilidad del biocarbón.....	50
Tabla 4. Procesos y aplicaciones más comunes encontradas con biomasa de palma de aceite .....	56
Tabla 5. Plantas de pirólisis en todo el mundo .....	61
Tabla 6. Compañías relacionadas con la industria de biocarbón, año 2015 .....	62

## Introducción

El cambio climático, la seguridad alimentaria, la preservación de la biodiversidad, el crecimiento poblacional y la expansión de la frontera agrícola, son aspectos que ponen retos al sector agropecuario para lograr soluciones que contribuyan a un desarrollo sostenible. Colombia no es ajena a estos retos y por tal razón es necesario lograr estrategias que aporten al equilibrio del sistema socioecológico y cumplir con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Es ahí donde la economía circular tiene un rol importante para superar estos retos. Su implementación permite cumplir con la demanda de bienes y servicios de la población y promueve la creación de nuevos negocios basados en los recursos biológicos y la biomasa residual generada en los sectores de la economía. De acuerdo con Bergerson *et al.* [1] y McCormick *et al* [2], se proyecta que la participación de mercado de los productos de base biológica aumentaría de 2 % en 2008 a 22 % en 2025 [1],[2]. En la Figura 1 se muestra los beneficios ambientales, sociales y económicos de la economía circular.



Figura 1. Beneficios sociales, económicos y ambientales del modelo de economía circular (adaptado de [3])

Es importante desarrollar e implementar tecnologías que permitan disminuir la dependencia de productos y procesos fundamentados en combustibles fósiles y recursos no renovables [2]. En Colombia, una fuente renovable con aumento en el potencial de uso es la biomasa residual agroindustrial y forestal. Esta biomasa puede ser usada para la producción de energía limpia, químicos y otros productos. Dentro de la biomasa agroindustrial se destaca la generada en el proceso de extracción de aceite de palma; en el cual, por cada tonelada de aceite de palma extraída se producen aproximadamente 1.9 t de biomasa residual (corresponde a 41 % de los racimos de fruta fresca). Considerando que en 2020 se obtuvieron 1.559.065 t de aceite de palma, se relaciona un total de 2.962.223 t de biomasa residual generada. Esta biomasa es poco utilizada o es depositada como acondicionador de suelos; sin embargo, gran parte de ella no es tratada de forma adecuada lo que puede generar problemas ambientales, además de perder la oportunidad de valorizarla [4],[5].

Bajo un enfoque de economía circular y un modelo de biorrefinería se podría utilizar la biomasa residual de forma integral para la obtención de tecnologías que permitan dar un manejo adecuado a la biomasa y generar productos comerciales a partir de esta [6],[7]. La agroindustria de aceite de palma ha venido trabajando en modelos de producción sostenible, en los cuales se destaca la obtención de energía renovable y el cierre de ciclos de materia y energía dentro de sus procesos [6]-[8]. Además, en los últimos años, la agroindustria de la palma de aceite ha ampliado la visión de la planta de beneficio ya que no solo se limita a la extracción de aceite de palma, sino que también se puede obtener productos a partir de biomasa [4]-[7]. García-Núñez *et al.* (2016) estudiaron la posibilidad que podrían tener las plantas de beneficio de aceite de palma para convertirse en una biorrefinería considerando los usos actuales de la biomasa y las tecnologías de conversión de biomasa más promisorias técnica, económica y ambientalmente [6],[7]. Dentro de las tecnologías emergentes y más promisorias para el uso de la biomasa está la pirólisis, un proceso termoquímico para obtención de biocarbón mediante la degradación térmica de la biomasa bajo una atmósfera limitada en oxígeno. Este proceso contribuye al aumento del área superficial y la formación de la química de superficie (grupos funcionales), lo que le confiere al biocarbón propiedades funcionales para diferentes aplicaciones comerciales [9],[10]. Adicionalmente, el proceso de pirólisis genera energía, gases síntesis y bioaceite que pueden ser usados como sustitutos de combustibles fósiles.

La producción de biocarbón es una medida de mitigación del cambio climático, debido a que almacena el carbono en una forma estable, evitando su liberación a la atmósfera por la degradación de la biomasa; adicionalmente, es un material muy

versátil por la gran cantidad de aplicaciones que puede tener [11]. Por ejemplo, la aplicación de biocarbón en el suelo incrementa los rendimientos de los cultivos y mejora las propiedades fisicoquímicas del suelo (pH, acidez, capacidad de retención de agua y capacidad de intercambio catiónico) [11]-[13]. Otras aplicaciones del biocarbón incluyen la remoción de contaminantes en agua tales como metales pesados, azul de metileno, nitrógeno, fósforo y oxianiones [13],[14].



# Primera parte



Foto: archivo Fedepalma.

## Economía circular en la agroindustria de la palma de aceite



La economía circular incluye los principios de la economía del rendimiento basados en el diseño de la cuna a la tumba, la biomímesis, el capitalismo natural y la economía azul [16]. La aplicación de este tipo de economía busca integrar la sostenibilidad ambiental y social al desarrollo económico. La economía circular en Colombia es entendida como “los sistemas de producción y consumo que promuevan la eficiencia en el uso de materiales, agua y energía, teniendo en cuenta la capacidad de recuperación de los ecosistemas, el uso circular de los flujos de materiales y la extensión de la vida útil a través de la implementación de la innovación tecnológica, alianzas y colaboración entre actores y el impulso de modelos de negocio que responden a los fundamentos del desarrollo sostenible” [17]. Este tipo de economía pretende un sistema productivo que se autorrestaure y autogenera por su diseño interconectado, tal como ocurre en la naturaleza donde los residuos de un organismo son la materia prima de otro.

La generación de biomasa residual en las plantas de beneficio de aceite de palma ha promovido el desarrollo de biorrefinerías para la síntesis de productos a partir de biomasa y la generación de energía renovable [18]. La biomasa líquida y sólida de palma de aceite está principalmente compuesta por los efluentes y el material vegetal que conforma los racimos de fruta fresca, respectivamente; esta biomasa tiene el potencial para ser transformada en energía y en otros productos de valor agregado. Los principales recursos usados en esta agroindustria son fertilizantes, agua, vapor, combustibles fósiles y electricidad, los cuales podrían ser suministrados a través de la conversión de una planta de beneficio en una biorrefinería [6],[18]. La aplicación de la economía circular en la agroindustria de aceite de palma puede convertir la biomasa residual de sus procesos en materia prima para su cadena de suministro y reducir el consumo de recursos de fuentes externas al sistema. De esta manera, se pueden crear sistemas productivos autogenerativos y sostenibles.

El aprovechamiento de la biomasa generada en las plantas de beneficio permite la circularidad de masa y energía en los procesos productivos como se muestra en la Figura 2. Rutas de conversión de biomasa (químicas, bioquímicas o termoquímicas) pueden ser usadas para la valorización de la biomasa residual y convertir las plantas de beneficio en biorrefinerías. La aplicación de estas rutas de conversión de biomasa produce nuevos productos que pueden aumentar la rentabilidad del sector palmero. Por ejemplo, considerando que el efluente (POME por sus siglas en inglés) de las plantas de beneficio tiene un potencial de uso para la generación de energía, en la actualidad, algunas de ellas han optado por la captura y aprovechamiento del biogás generado en el tratamiento del POME a través del carpado de las lagunas del sistema de tratamiento. En este caso, el biogás es utilizado para la

generación de electricidad o vapor, servicios industriales indispensables en el proceso de extracción de aceite de palma [8].

También, el uso de los vertimientos del sistema de tratamiento del POME en fertirriego para las plantaciones, disminuye el uso de la huella de agua verde y la demanda del recurso hídrico en la etapa de cultivo. Con la disposición adecuada de la biomasa sólida residual en campo o la fabricación de compost, se hace una recirculación de nutrientes que pueden ser aprovechados de nuevo por el cultivo y se obtienen productos que pueden mejorar las propiedades del suelo [19]. El aprovechamiento del cuesco y la fibra de palma como combustible para sistemas de cogeneración de vapor y electricidad, ha permitido la descarbonización de los procesos de la agroindustria y la mitigación de emisiones de GEI relacionadas con la demanda de energía [8].

Es necesario cambiar la visión lineal de los procesos productivos; la aplicación de la circularidad disminuye la presión sobre los servicios ecosistémicos de la naturaleza y promueve procesos con menor impacto ambiental. Respecto a los beneficios económicos del uso de la biomasa en economía circular, en algunos casos se ha estimado reducción en los costos de los materiales. Así mismo, el modelo de economía circular genera eficiencias en el uso de materiales y en la disposición de residuos. Al reutilizar materiales, agua y energía, se generan beneficios económicos por obtener valor agregado varias veces de un mismo recurso. La reducción en el uso de materiales, agua y energía, promueve la disminución de emisiones y residuos descargados en el ambiente, en el marco de la economía circular; aumenta el uso de energía renovable y contribuye a la conservación de recurso hídrico mediante el uso eficiente del agua. Respecto a los beneficios sociales, incentiva el fortalecimiento de los tejidos sociales en los territorios, la generación de conciencia ambiental y la promoción de la ciencia y la tecnología para el desarrollo de nuevos negocios.





## Segunda parte



Foto: David Munar

Biomasa de palma como precursor de biocarbón



Biomasa hace referencia a todo material orgánico biodegradable y no fosilizado originado por plantas, animales y microorganismos [20]. La agroindustria de la palma de aceite es actualmente líder a nivel mundial en la provisión de aceites y grasas y uno de los sectores con mayor potencial por la versatilidad de usos y aplicaciones de sus productos (aceite de palma y de palmiste) y subproductos (biomasa). La cantidad de biomasa almacenada en campo es variable y está conformada por el estípite, las hojas, las raíces, la biomasa depositada en el suelo y las coberturas implementadas en los cultivos, además de los racimos de fruta fresca que son cosechados y enviados a la planta de beneficio. En el proceso de extracción de aceite se generan tres productos principales (aceite de palma crudo, aceite de palmiste y torta de palmiste), biomasa sólida (cuesco, fibra, tusa) y líquida (efluentes). La Figura 3 muestra las etapas del proceso de extracción de aceite de palma y los flujos de salida de la biomasa obtenida.

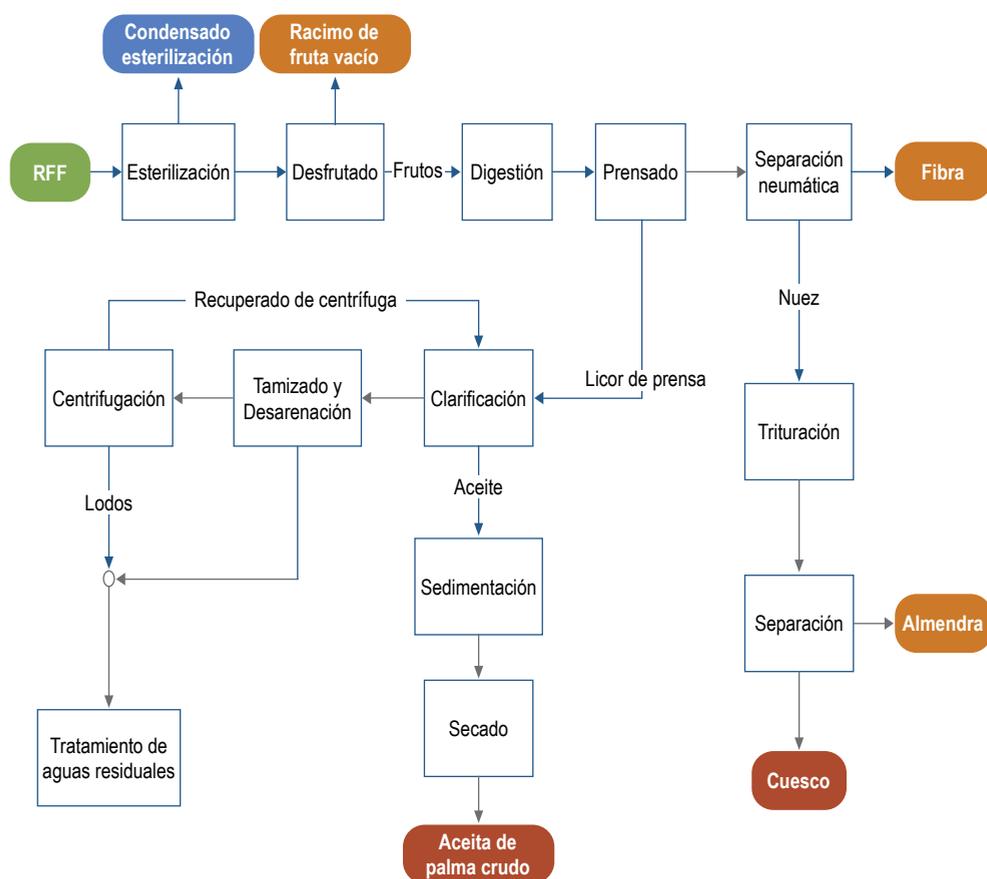


Figura 3. Diagrama de operaciones del proceso de extracción de aceite de palma.

El porcentaje de biomasa en base húmeda obtenida durante el proceso de extracción de aceite de palma es de 41 % (% en peso RFF), representada, en promedio, por el 21 % de tusa, 13 % de fibra y 5 % de cuesco. Respecto al uso actual de esta biomasa, el 63 % de la tusa es dispuesta en campo, la fibra (80 %) y el cuesco (67 %) se usan como combustible de calderas para la generación de vapor/energía. El porcentaje restante de fibra y tusa son utilizados en el proceso de compost y el restante de cuesco es vendido a otras industrias para diferentes usos [5],[21]. Las propiedades fisicoquímicas del cuesco de palma, como su alta densidad ( $703 \text{ kg/m}^3$ ), contenido de carbono (53,29 %) y bajo contenido de cenizas (1,35 %) lo hacen un precursor adecuado para la obtención de carbón activado [22]. Además, la biomasa de palma es un producto renovable y neutro en carbono porque proviene del proceso natural de la fotosíntesis, por tal razón su contenido de carbono es biogénico [23]. La Tabla 1 muestra algunas propiedades fisicoquímicas de la biomasa generada en la cadena productiva del aceite de palma. En general, la biomasa de palma presenta densidades por debajo de  $200 \text{ kg/m}^3$ ; excepto para el cuesco, lodos de clarificación y lodos de lagunas, que tienen densidades mayores. Además, la presencia de elementos inorgánicos como hierro (Fe), calcio (Ca) y potasio (K) pueden contribuir en el proceso catalítico de la pirólisis e influenciar el rendimiento en la producción y las propiedades de superficie del biocarbón [24].

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas de la biomasa de palma [24].

	Biomasa	Estipite	Hojas	Cuesco	Raíces	Lodos clarificación dinámica	Tusa	Fibra	Lodos lagunas
	Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	152	174	703	181	593	125	150	896
Análisis próximo (b. s. *) (% m)	Material volátil	79,98	78,90	72,58	68,32	72,13	79,16	75,43	51,70
	Carbono fijo	16,17	17,87	26,14	22,28	12,75	15,43	18,24	11,42
	Cenizas	3,69	3,12	1,35	8,49	14,79	5,48	5,82	36,43
Análisis elemental (b. s. *) (%)	C	45,91	45,94	53,29	50,58	45,60	49,73	50,85	32,39
	N	0,42	0,19	0,30	0,28	2,38	1,01	1,05	5,07
	H	6,38	6,39	6,15	6,28	6,41	6,92	6,71	4,83
	O	33,19	33,24	41,54	44,60	36,40	32,61	42,14	32,08
	S	<0,01	<0,01	0,01	<0,01	0,24	0,07	0,09	0,77
Otros elementos (b. s. *) (ppmm)	Si	142,07	353,18	143,71	426,18	364,44	330,54	375,41	10.907,68
	Fe	1.086,96	581,11	2.438,06	7.959,66	1.525,26	533,80	889,73	5.915,44
	Ca	1.668,57	3.817,10	21.407,33	841,39	14.366,06	5.103,02	4.042,47	38.886,73
	Mg	10,98	1.630,22	744,80	1.311,93	4.737,85	2.705,57	2.026,11	18.892,55
	Na	431,83	209,15	47,87	99,01	96,85	285,67	63,02	526,18
	K	175,63	20.994,04	2.708,62	7.909,73	27.435,65	46.331,60	7.362,17	70.791,31
	Poder calorífico (MJ/kg)	16,11	15,81	18,72	16,30	17,00	18,18	18,20	11,19

Continúa

	Biomasa	Estipite	Hojas	Cuesco	Raíces	Lodos clarificación dinámica	Tusa	Fibra	Lodos lagunas
Contenido de lignocelulosa (b. s. *) (% m)	Celulosa	39,40	54,35	37,95	49,00	21,85	37,82	33,58	2,59
	Hemicelulosa	25,97	20,72	11,52	19,19	13,51	21,85	25,41	8,25
	Lignina	6,64	8,96	38,15	29,26	20,91	12,16	21,38	30,47
	Extractivos	27,99	15,96	12,38	2,55	43,73	28,17	19,63	58,69
	Conductividad térmica (W/m*K)	0,08	0,09	0,14	n.a	0,12	n.a	0,12	0,17

\* b.s. Base seca

## Tercera parte



Foto: David Munar, EQUIPO: Reactor de pirólisis Sirius Regenerative Solutions S.A.S. Zomac

## Generalidades del biocarbón



## ¿Qué es biocarbón?

El biocarbón o carbón vegetal se define como el residuo carbonoso que queda tras una carbonización de biomasa. La iniciativa internacional de biocarbón (IBI, por su sigla en inglés) lo define como un material sólido obtenido de la conversión termoquímica de biomasa bajo una atmósfera limitada en oxígeno. Su producción comprende varias etapas, a saber, una inicial donde se produce la eliminación de agua contenida en la biomasa y se genera una cierta volatilización de compuestos como hidrocarburos livianos ( $C_2H_6$ ,  $C_2H_4$  y  $C_2H_2$ ) [25]. En la etapa intermedia se produce el carbón primario que se origina tras una rápida volatilización de compuestos orgánicos, con generación de gases. En la final, el biocarbón se descompone lentamente formando sólidos residuales con alto contenido de carbono fijo. El rendimiento de biocarbón depende de las condiciones de operación, de la temperatura, la velocidad de calentamiento y de la composición de la biomasa. Al aumentar la temperatura y la velocidad de calentamiento, disminuye el rendimiento a biocarbón, pero favorece la producción de gases y alquitranes [26]. Sin embargo, el factor predominante en el rendimiento es la proporción de la composición de celulosa, hemicelulosa y lignina de la biomasa; el rendimiento disminuye en biomasa con alto contenido de celulosa [27],[28]. Dentro de los principales beneficios del biocarbón se destaca su uso como enmendador de suelo y su contribución en la reducción de las emisiones de GEI provenientes de la degradación natural de biomasa (secuestro de carbono) [28],[29].

## Pretratamiento físico de la biomasa

La biomasa generalmente presenta formas diferentes y contenidos de humedad elevados. La mayoría de los procesos de transformación de biomasa requieren contenidos de humedad bajos y tamaños de partícula pequeños y uniformes ya que los grandes dificultan los fenómenos de transporte, incrementan el uso de recursos y los tiempos de proceso [30],[31]. El uso de fertilizantes durante las fases de cultivo y las lluvias ocasionan que el contenido y la composición de cenizas en la biomasa sea variable [32], lo que también puede afectar los procesos termoquímicos. El pretratamiento de la biomasa debe buscar: mejorar la capacidad de almacenamiento, reducir el contenido de impurezas, el tamaño, el contenido de humedad, incrementar la densidad energética por unidad de volumen y homogenizar la biomasa.

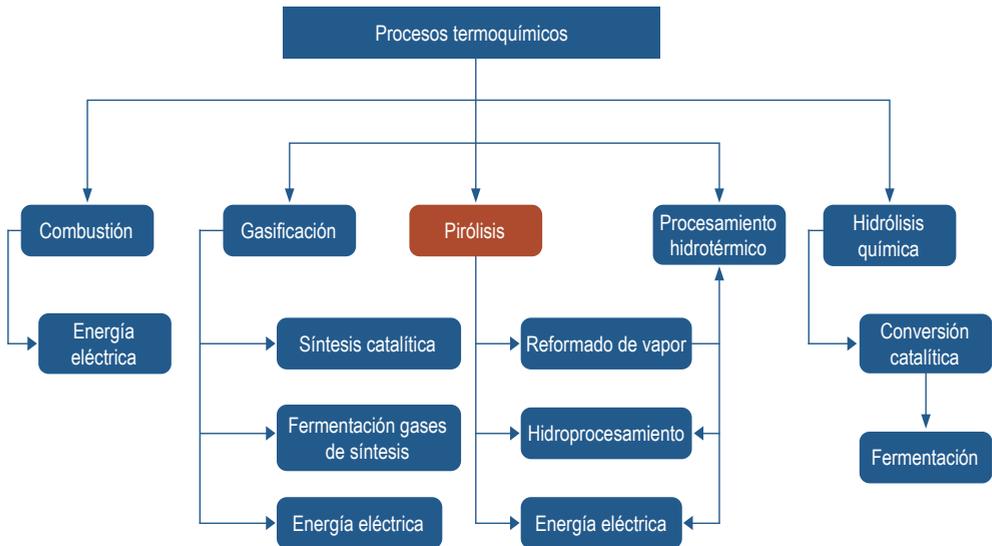
## Procesamiento termoquímico de biomasa

La biomasa puede ser convertida en químicos y energía a través de procesos termoquímicos y bioquímicos. Los factores que influyen en la selección del proceso de conversión incluyen el tipo y cantidad de biomasa disponible, el producto final, los requerimientos ambientales, los costos de producción y el avance tecnológico del proceso. Los procesos termoquímicos de biomasa usan calor y catalizadores para transformar los polímeros vegetales a combustibles, químicos, calor y electricidad, mientras que los procesos bioquímicos usan enzimas y microorganismos para el mismo propósito [33]. Sin embargo, el proceso termoquímico presenta algunas ventajas como la producción de un rango amplio de combustibles de hidrocarburos, tiempos de reacción mucho más cortos, costos bajos y posible recuperación de catalizadores, y no requiere procesos de esterilización de materias primas para el proceso. Dentro de las conversiones termoquímicas, las opciones de proceso son combustión, gasificación, pirólisis y licuefacción o hidrotreatmento (Figura 4). El tratamiento termoquímico de la biomasa puede convertirla en productos combustibles sólidos (biocarbón), líquidos (bioaceite<sup>1</sup> o alquitrán) y gaseosos (gases de síntesis), pero las proporciones de cada producto varían según las condiciones de producción (temperatura, presión, velocidad de calentamiento, atmósfera). Durante el proceso también se forman subproductos no deseados de alquitranes que deben ser removidos o convertidos para su aprovechamiento [34].

La conversión termoquímica más aplicada a nivel industrial ha sido la combustión para generar calor o electricidad. Después de la combustión, la gasificación es el proceso de conversión con mayor potencial de uso, seguida de la pirólisis, donde la degradación de la biomasa ocurre en la ausencia de oxígeno [35] a temperaturas moderadas (450-550 °C) produciendo biocarbón (30-40 %), bioaceite (40-50 %) y pequeñas cantidades de gases de síntesis [36]-[38]. El procesamiento hidrotérmico es una ruta para obtener biocombustibles a partir de biomasa en presencia de un solvente a temperaturas entre 250-550 °C y presiones entre 5-25 MPa. Se considera que la licuefacción de biomasa es una tecnología más limpia comparada con la combustión directa, debido a que no genera gases contaminantes ni material particulado [39]. La hidrólisis química produce azúcares simples que pueden ser convertidos catalíticamente o biocatalíticamente en combustibles; ácidos concentrados o la acción combinada de ácidos diluidos y calor son usados para hidrolizar polisacáridos a monosacáridos a través de la hidrólisis ácida de biomasa [40].

---

1 El bioaceite tiene varios sinónimos, también es conocido como: *liquid smoke*, *wood distillate*, aceite de pirólisis, ácido piroleñoso, líquido de pirólisis, aceite biocrudo. Su nombre también depende de la fracción de este líquido a la cual se hace referencia.



**Figura 4.** Opciones termoquímicas para producir combustibles, químicos y energía; adaptado de [41]

A continuación, se describe con mayor detalle cada una de las opciones de procesamiento termoquímico de la biomasa acorde a la Figura 4.

## Combustión directa

La combustión es el proceso directo para convertir la biomasa en energía útil. El propósito del proceso de combustión es liberar la energía de la biomasa almacenada en los enlaces químicos de sus moléculas. Al momento que se realiza la combustión, la energía es convertida en calor sensible, transportado en los gases de combustión calientes. Este calor se puede usar directamente o se puede transferir a un fluido de trabajo en un intercambiador de calor [42]. Con este fluido de trabajo, la energía térmica se puede convertir a energía mecánica para su aprovechamiento. Los equipos de combustión de biomasa se basan en tecnologías de combustión de carbón.

## Gasificación

La gasificación transforma la biomasa en una mezcla de gases ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e hidrocarburos de mayor peso molecular) controlando la cantidad de agente gasificante (oxígeno, aire, vapor de agua o la mezcla de estos gases), la temperatura del proceso ( $> 700\text{ }^\circ\text{C}$ ) y manteniendo un ambiente pobre en oxígeno [41]. El proceso se desarrolla a elevada temperatura y los gases producto de la gasificación de biomasa tienen posibles usos en caldera, turbinas o motores con un previo acondicionamiento [43].

El rendimiento del biocarbón obtenido por gasificación está alrededor del 10 % por lo que el mayor producto de este proceso es el gas de síntesis que dependiendo del agente gasificante utilizado puede tener mayor o menor poder calorífico [44]. Las etapas o pasos del proceso de gasificación pueden ocurrir en lapsos de tiempo muy cortos, dependiendo del tamaño de partícula de la biomasa, la velocidad de transferencia de calor y los fenómenos de transporte que ocurren en el reactor. La Figura 5 muestra los pasos generales del proceso de gasificación.

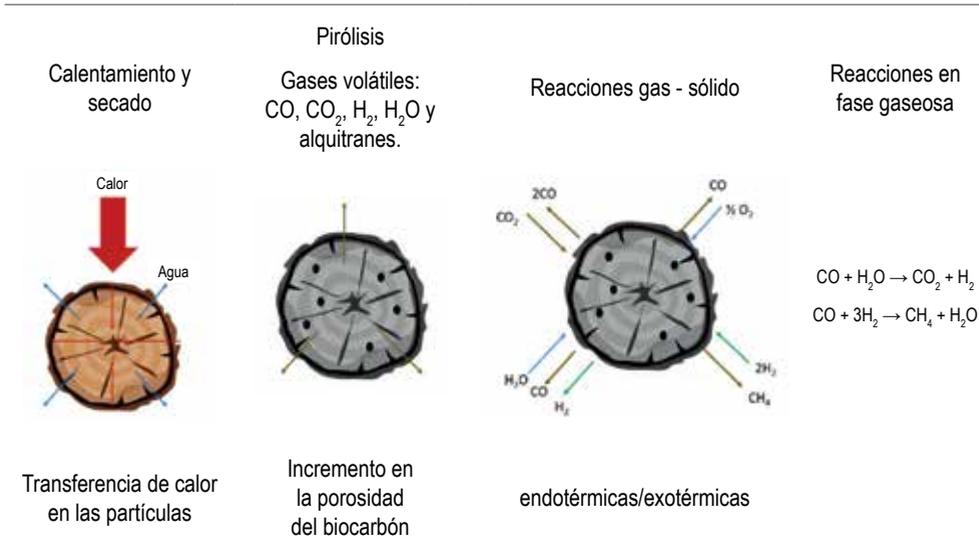


Figura 5. Pasos del proceso de gasificación térmica de biomasa, adaptado de [41].

## Procesamiento hidrotérmico

La carbonización hidrotérmica de biomasa (HTC, del inglés *hydrothermal carbonization*) se lleva a cabo con la presencia de agua a temperaturas entre 160-800 °C. Durante este proceso, el agua debe permanecer líquida, y para esto se mantienen presiones de operación por encima de 1 atm de presión. La carbonización hidrotérmica es clasificada de acuerdo con la temperatura de reacción, HTC de alta temperatura (300-800 °C) y HTC de baja temperatura (< 300 °C), también conocida como licuefacción o pirólisis hidrotérmica. Una ventaja que tiene este proceso termoquímico sobre los tratados anteriormente es que la biomasa no necesita ser adecuada con respecto a su contenido de humedad. En la HTC la biomasa es descompuesta en moléculas de menor peso molecular, que más adelante pueden reaccionar y repolimerizar en compuestos

aceitosos con un amplio rango de pesos moleculares. Este tipo de procesamiento termoquímico ofrece ciertas ventajas en comparación con otros procesos para producir bioaceites y biocarbón. Con este proceso se tienen altos rendimientos, alta eficiencia de energía y separación, y la versatilidad de utilizar mezclas de diferentes materias primas como residuos y lignocelulosa [20].

## Hidrólisis química

La hidrólisis química permite la transformación de polisacáridos de biomasa tales como la celulosa, hemicelulosa y la lignina a moléculas más simples como los monosacáridos. Estos azúcares, por medio de rutas químicas o bioquímicas, pueden ser transformados en combustibles y productos de valor agregado. La hidrólisis homogénea usa ácidos inorgánicos ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HCl}$  y  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) y líquidos iónicos. A pesar de que tienen un alto rendimiento y selectividad, el uso de estos ácidos genera problemas de contaminación si no son manejados de forma adecuada. Las últimas investigaciones de este proceso están direccionadas al desarrollo de catalizadores ácidos heterogéneos que permitan la transformación de la biomasa y la recuperación de los catalizadores para evitar, de esta forma, la contaminación ambiental [45]-[47].

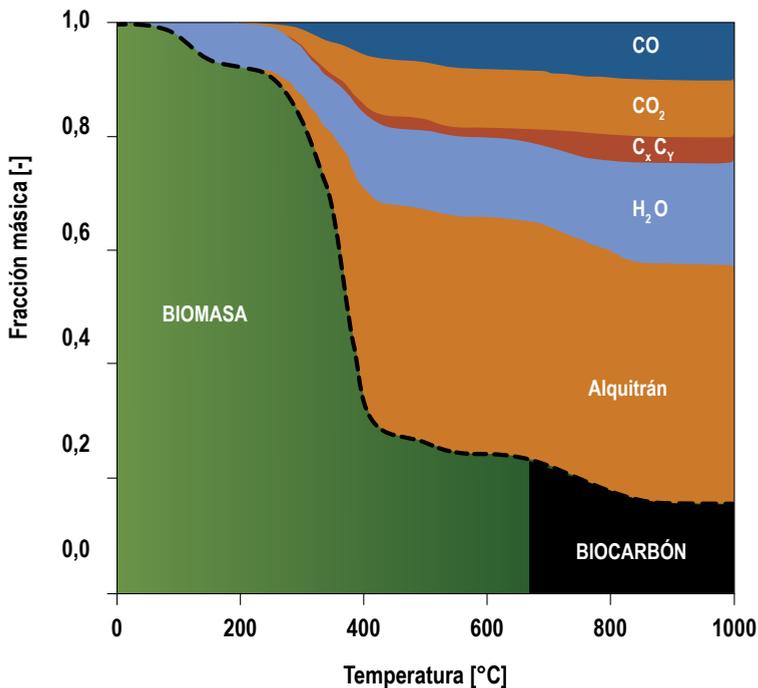
## Pirólisis

El método más común para producir biocarbón es la pirólisis. Esta puede ser clasificada en pirólisis lenta, pirólisis rápida y pirólisis *flash*, dependiendo de la velocidad de calentamiento y el tiempo de residencia de la biomasa. Los principales parámetros de operación para procesos de pirólisis están dados en la Tabla 2. La pirólisis lenta, también llamada carbonización, produce biocarbón en mayor proporción, por el calentamiento lento de la biomasa y tiempos de residencia prolongados. La pirólisis rápida produce menor proporción de biocarbón a una alta velocidad de calentamiento (10-200 °C/s), por lo que es considerada más idónea para producir líquidos y gases en comparación a la pirólisis lenta [48]. La pirólisis *flash* es similar a la pirólisis rápida, las temperaturas son superiores a 1.000 °C y los tiempos de residencia de pocos segundos, pero para que este proceso sea eficiente, se requiere un tamaño de partícula más pequeño comparado con las otras dos opciones de pirólisis.

**Tabla 2.** Principales parámetros de operación para proceso de pirólisis [20],[49].

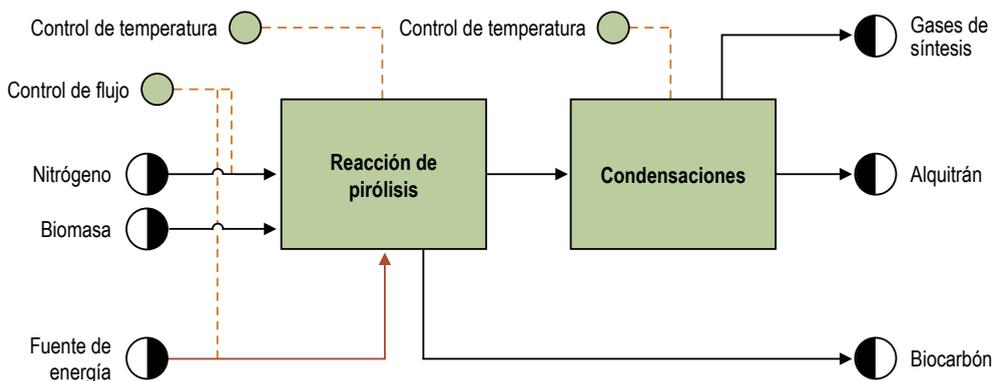
Parámetro	Unidad	Pirólisis lenta	Pirólisis intermedia	Pirólisis rápida	Pirólisis <i>flash</i>
Temperatura de pirólisis	°C	300-700	~500	600-1000	800-1000
Velocidad de calentamiento	°C/s	0,1-1	1-10	10-200	>1000
Tamaño de partícula	mm	5-50	1-50	< 1	<0,2
Tiempo de residencia	s	Horas-días	5-30 s	0,5-10 s	<0,5 s

A través de la variación de los parámetros del proceso de pirólisis como el tipo de biomasa, la temperatura máxima, las condiciones de la atmósfera de reacción, la tasa de calentamiento y el tiempo de residencia de los productos en el reactor, es posible influir en la distribución y características de los productos. Bediaga *et al.* (2018) en su estudio mostraron cómo varía la fracción de productos de pirólisis dependiendo de la temperatura de pirólisis, a mayor temperatura aumentan la fracción de gases y alquitranes y disminuye la fracción de biocarbón (Figura 6) [50].

**Figura 6.** Fracción másica de los principales productos de pirólisis, adaptado de [50]

## Reactores de pirólisis

Los criterios de diseño de los reactores de pirólisis son importantes, debido a que permite controlar los parámetros del proceso que influyen directamente en las propiedades del biocarbón y demás productos. Los reactores de pirólisis se pueden clasificar de lecho fijo, caída libre, lecho fluidizado, inducción y catalítico de lecho fijo. Para el diseño del reactor de pirólisis se debe considerar el material de fabricación, el diámetro, la altura, la materia prima o precursor de carbono, el tamaño de partícula y el sistema de aislamiento adiabático [51]. El proceso en un reactor cuenta con tres pasos, el primero es la reacción de pirólisis, el segundo es la operación de condensación y el tercero corresponde a la separación de alquitranes y gases de síntesis. El uso de nitrógeno en el reactor de pirólisis permite mantener la atmósfera inerte durante la reacción y así evitar la combustión de la biomasa por la acción de la temperatura. La temperatura de reacción se controla a través de la fuente de energía primaria y su respectivo flujo. En la etapa de condensación y separación de gases de síntesis y alquitrán, es necesario controlar la temperatura de condensación para recuperar sustancias volátiles en la corriente de alquitrán (Figura 7).



**Figura 7.** Diagrama del proceso de pirólisis

Los procesos de pirólisis (lenta, intermedia y rápida) pueden ser llevados a cabo en diferentes tipos de reactores [51]. En el caso de la pirólisis lenta, se han usado reactores cilíndricos de lecho fijo y hornos rotatorios; para la intermedia, reactores de lecho fijo; y en el caso de la rápida, diferentes tipos de reactores como de lecho fluidizado, circulante de lecho fluidizado, placa ablativa, tornillo/sinfín, cono giratorio y ciclón/norte (Figura 8); en alguno de estos reactores se usa arena como portador de calor para mejorar la transferencia de energía en el proceso [49],[52]. Para una conversión eficiente de la biomasa, los reactores deben tener una adecuada

transferencia de calor y masa, ya que a menor tamaño de partícula (biomasa), los fenómenos de transferencia de calor en el equipo son más eficientes. A velocidades altas de calentamiento se favorece la producción de gases y alquitranes debido a que se evitan reacciones secundarias. Los reactores son diseñados bajo diferentes métodos de calentamiento que aseguran la conversión eficiente de la biomasa.

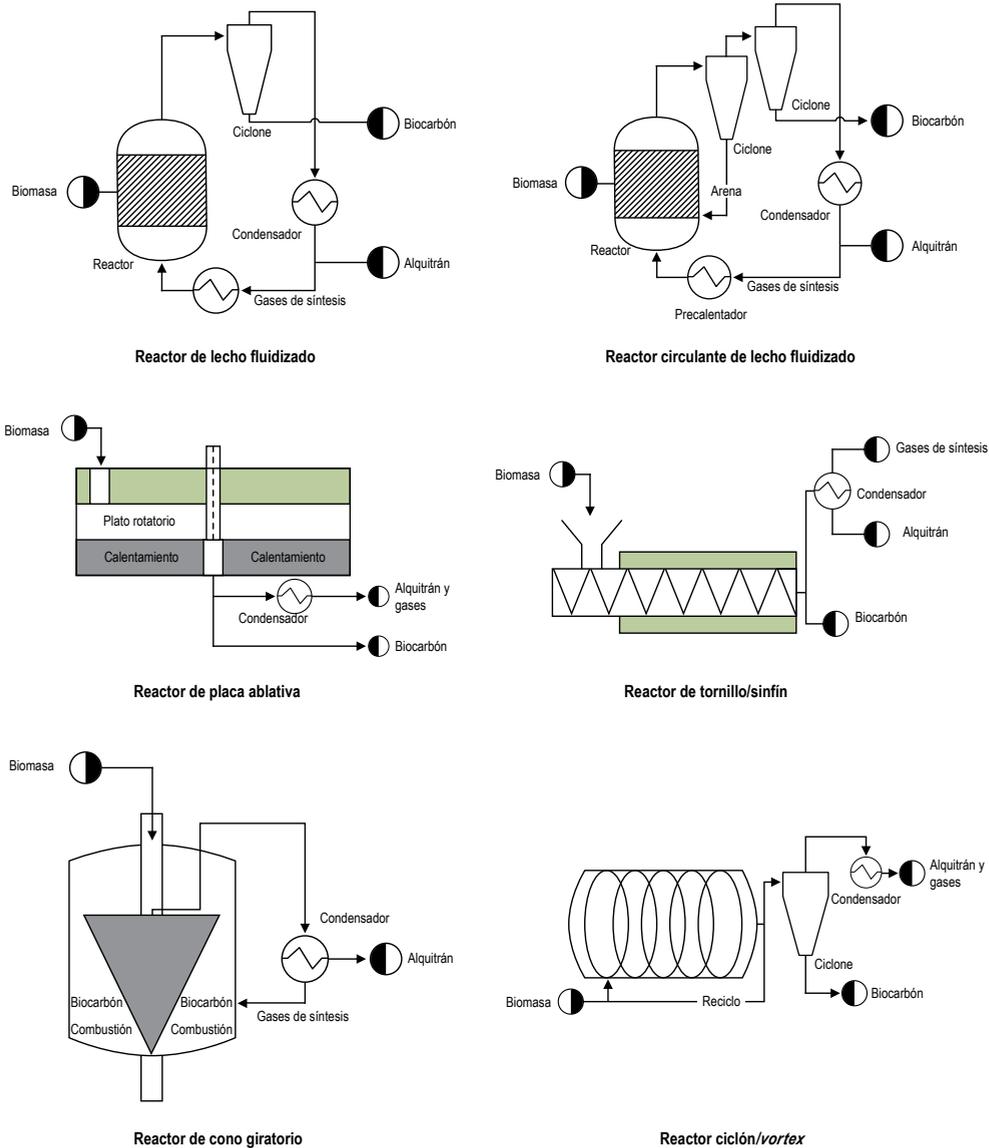


Figura 8. Diferentes tipos de reactores de pirólisis, adaptado de [49]

# Cuarta parte

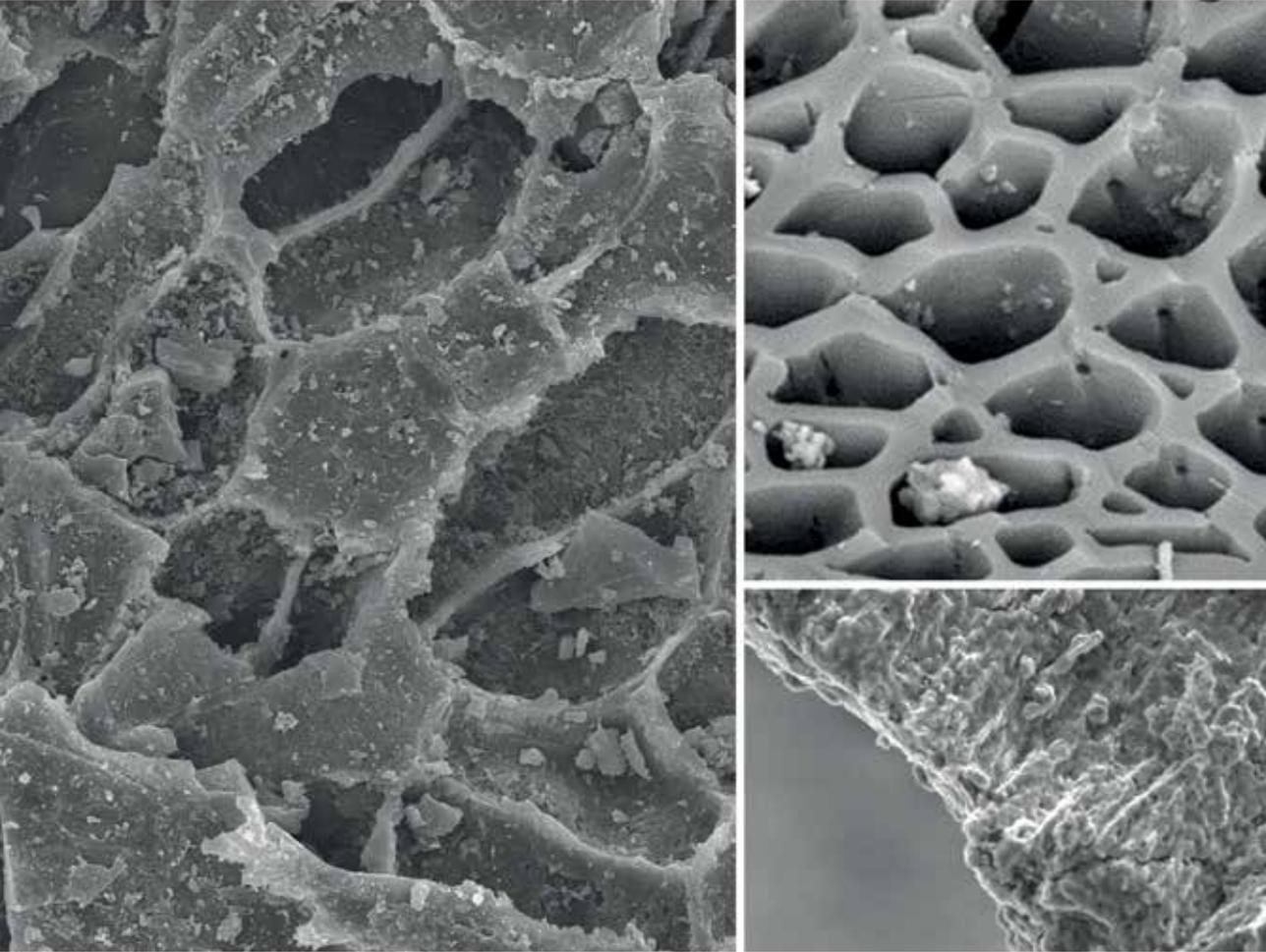
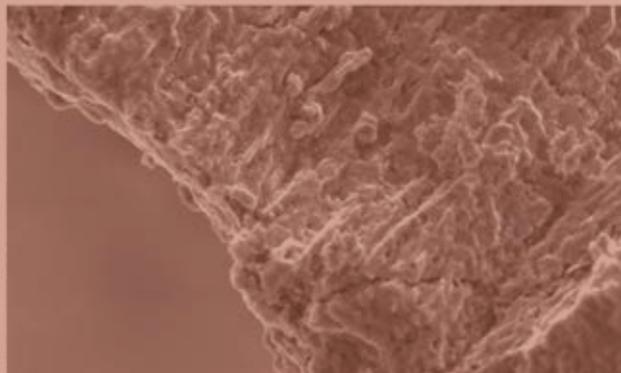
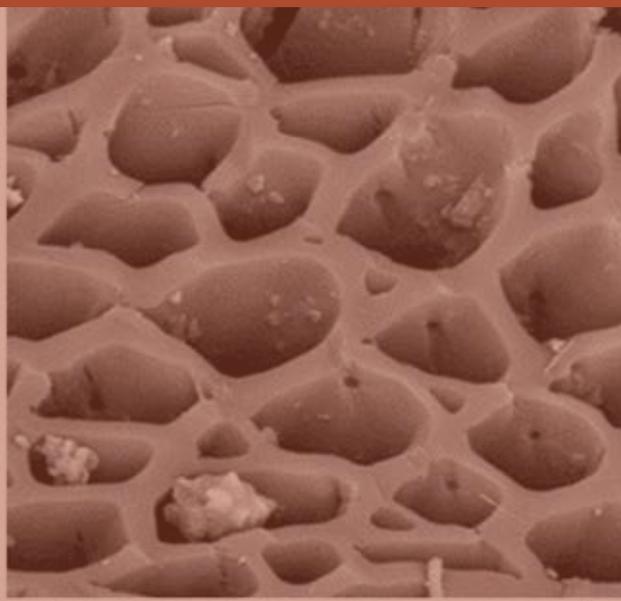
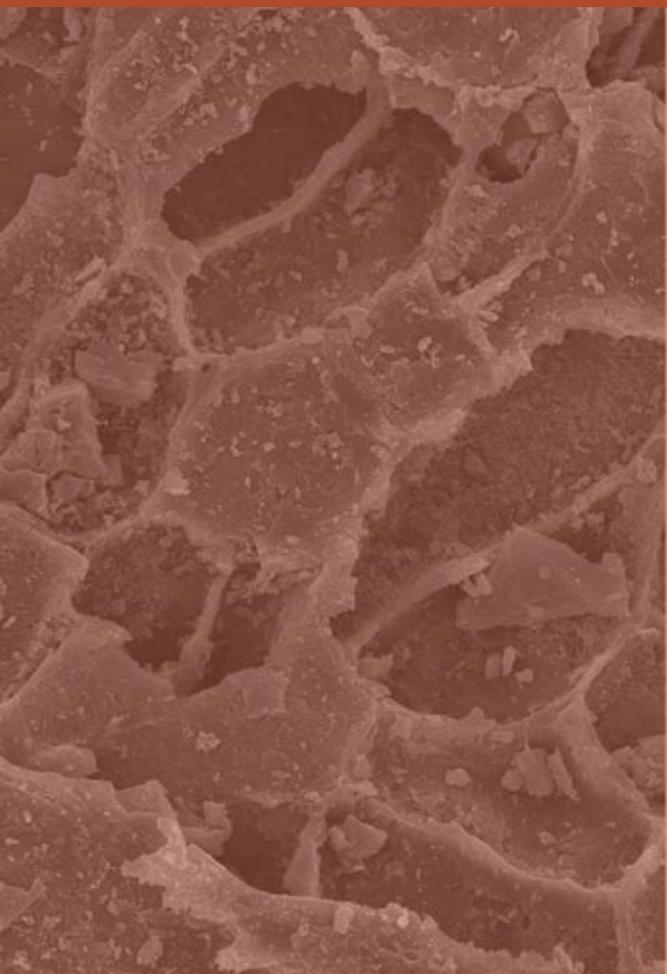


Foto: izquierda: David Munar; derecha: Mat&mpac, Universidad de Medellín, Nancy Yamile Acelas-Soto

## Procesos de activación del biocarbón



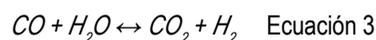
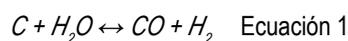
El proceso de activación permite adicionar propiedades funcionales al biocarbón para aplicaciones en específico como adsorción de contaminantes y fabricación de catalizadores. Los métodos más comunes para modificar las propiedades del biocarbón son la activación física y la activación química. La activación física incluye principalmente el uso de vapor de agua y gases ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{NH}_3$  y  $\text{O}_2$ ) a altas temperaturas. La activación química incluye modificaciones ácidas, alcalinas y adiciones de agentes de oxidación como sales metálicas, entre otros (Figura 9).



Figura 9. Métodos de activación del biocarbón.

## Activación física

Las activaciones con vapor de agua o gases están compuestas por dos procesos. El primero es la pirólisis de la biomasa, seguido del proceso de gasificación usando vapor de agua u otros gases [53]. Durante la activación con vapor de agua, el oxígeno del agua es intercambiado en los sitios activos de la superficie del biocarbón y el hidrógeno resultante reacciona con el carbono de la superficie del biocarbón para formar compuestos complejos de hidrógeno. Este tipo de activación tiene dos objetivos, facilitar la desvolatilización y la formación de carbón cristalino y remover material que no fue pirolizado por completo (Ecuación 1 a Ecuación 3). La activación con vapor de agua mejora el área superficial y la estructura del biocarbón [53],[54].



El uso de gases para la activación física busca aumentar el área superficial por medio de la formación de poros y microporos. Cuando se usa amonio, la finalidad es enriquecer el área superficial con grupos nitrogenados.

## Activación química

La modificación ácida es usada para remover metales e introducir grupos funcionales ácidos en la superficie del biocarbón para mejorar la capacidad de adsorción y la selectividad del material. Los ácidos usados comúnmente son el ácido clorhídrico (HCl), el ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), el ácido nítrico ( $HNO_3$ ), el ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ), el ácido oxálico ( $H_2C_2O_4$ ) y el ácido cítrico ( $H_8C_6O_7$ ) [55]-[57]. La modificación ácida realizada con ácido fosfórico puede mejorar la estabilidad térmica y la acidez de la superficie a través de la formación de grupos funcionales oxígeno – fósforo; los biocarbones obtenidos pueden ser usados como catalizadores ácidos para reacciones de deshidratación de alcoholes e hidrocrackeo de aceites pirolíticos [58]. Algunas activaciones se han realizado con ácidos orgánicos debido a su baja toxicidad e impacto ambiental, el uso de estos agentes de activación ácidos busca mejorar la química de superficie y aumentar la capacidad de adsorción [59].

La modificación alcalina busca incrementar el área superficial y el contenido de grupos funcionales con contenido de oxígeno para mejorar la capacidad de adsorción del material. Los agentes alcalinos usados comúnmente son hidróxido de potasio (KOH) e hidróxido de sodio (NaOH). Los procesos de activación pueden ser divididos en uno o dos pasos. Para procesos de un paso, el agente de activación es mezclado con el precursor de carbono mientras que, para procesos de dos pasos, inicialmente se prepara el biocarbón, y después este es mezclado con el agente de activación y llevado a la temperatura de activación (700-1.200 °C) [60].

Las modificaciones con sales metálicas u óxidos metálicos pueden cambiar las propiedades de adsorción, catálisis y magnéticas. Las modificaciones metálicas se pueden hacer de dos formas: en la primera, la fuente del metal es mezclada con la biomasa (precursor de carbono) y posteriormente, dicha mezcla es pirolizada; en la segunda, el biocarbón es fabricado y luego es mezclado con la sal u óxido de metal bajo condiciones controladas [61]. Los metales usados para hacer estas modificaciones pueden ser hierro (Fe), magnesio (Mg), aluminio (Al) y manganeso (Mn). La adición de estos metales al biocarbón le confiere la propiedad de adsorber contaminantes presentes en fase acuosa y gaseosa [62],[63]. Las modificaciones metálicas mejoran la adsorción de compuestos específicos, por ejemplo, cuando un biocarbón tiene baja afinidad por compuestos aniónicos, las modificaciones metálicas pueden mejorar su

capacidad de adsorción para estos compuestos. La adición de hierro puede conferir propiedades magnéticas al biocarbón, lo que facilita su recuperación después de haber sido usado en procesos acuosos [61]. Con la adición de metales se mejoran las propiedades catalíticas del biocarbón, mejorando de esta forma el desempeño de las reacciones químicas donde sea utilizado [64].



# Quinta parte



Foto: Contruccion por David Arturo Munar-Flórez

## Aplicaciones del biocarbón



El biocarbón tiene un papel importante en la estrategia de mitigación del cambio climático, la promoción de la sostenibilidad ambiental y el incremento de la productividad agrícola, por ejemplo, la aplicación de biocarbón al suelo facilita el almacenamiento de carbono, mejora la fertilidad e incrementa los rendimientos de los cultivos [65],[66]. En adición, el biocarbón es un material versátil que puede ser utilizado en la remoción de contaminantes en fase líquida o gaseosa, en catálisis para la industria química y como secuestrador de carbono como medida de mitigación del calentamiento global [11]. Estas aplicaciones pueden tener beneficios sociales o económicos; de esta manera, el uso de biocarbón toma un papel importante dentro de la producción sostenible. El uso de la biomasa de palma para estas aplicaciones es viable, puesto que a partir de la tusa se ha logrado obtener biocarbón con área superficial de 720 m<sup>2</sup>/g, además de la presencia de grupos funcionales en su superficie lo que le confiere propiedades de adsorción a este material [67]. Respecto al cuesco de palma, se han obtenido biocarbones con áreas superficiales entre 1.000 - 1.500 m<sup>2</sup>/g, estas propiedades muestran que puede ser utilizado como material adsorbente o soporte para catalizadores [22]. Cabe recordar que las propiedades del biocarbón dependen del precursor de carbono, las condiciones de pirólisis y la activación, donde la temperatura juega un papel importante en sus propiedades resultantes [68],[69].

A continuación, se describen las aplicaciones más utilizadas del biocarbón obtenido a partir de biomasa de palma de aceite.

## Enmendador de suelo

El biocarbón como enmendador del suelo puede mejorar la capacidad de retención de agua y también disminuir la lixiviación de fertilizantes nitrogenados, además, de otros beneficios agronómicos [70],[71]. La aplicación directa de biocarbón al suelo aumenta su fertilidad, permite la remediación de contaminantes presentes e incrementa el almacenamiento de carbono total [72],[70],[73]. Propiedades como el pH, la densidad, la capacidad de retención de agua y la capacidad de intercambio catiónico son mejoradas por la adición de biocarbón al suelo [74]. La microbiología del suelo también se beneficia con la aplicación de biocarbón; Liu *et al.* [75] mostraron cómo la actividad de las enzimas del suelo incrementaba junto con la respiración basal de este y la tasa de utilización de carbono.

El biocarbón de cuesco de palma impregnado con fuentes de N y P ha sido estudiado como fertilizante de liberación lenta y secuestrador de carbono [72]. Así como para la modificación del pH en suelos ácidos, encontrando por ejemplo que la adición de 30 t/ha de biocarbón de cuesco de cacao y palma pueden incrementar el pH en 0,5 y

0,05 unidades, respectivamente [76]. Chintala *et al.* [77] encontraron que es posible incrementar el pH del suelo en 1,36 unidades usando biocarbón a una dosis de 156 t/ha. Por otro lado, en estudios realizados sobre los efectos de la aplicación de biocarbón de tusa de palma de aceite en cultivos de arroz, se encontraron aumentos en los rendimientos del cultivo y los pH de los suelos, y disminución de la toxicidad de aluminio ( $Al^{+3}$ ) [78]. El biocarbón de tusa se ha usado también para la degradación de herbicidas (imazapic e imazapyr) en el suelo, encontrando que este tiene mejor efecto debido a su composición y a los grupos funcionales en su superficie comparado con biocarbón de cascarilla de arroz [79]. El uso del biocarbón procedente de los residuos de los racimos de fruta fresca puede mejorar las propiedades del suelo (conductividad hidráulica, porosidad, capacidad de intercambio catiónico y el límite superior de drenado) debido al área superficial y el volumen de poro de los biocarbones [80].

## Adsorbente de contaminantes

El biocarbón activado para aplicaciones como adsorbente se caracteriza por tener área superficial ( $> 1 \text{ m}^2/\text{g}$ ) y la presencia de grupos funcionales en su superficie, como hidroxilo y carboxilo [81]. El biocarbón como adsorbente de contaminantes presenta diferentes áreas superficiales, estructuras porosas y grupos funcionales. Estas características varían con respecto a las condiciones de producción y permiten adsorber diferentes compuestos orgánicos e inorgánicos tanto en fase acuosa como en fase gaseosa [81].

## Adsorbente en fase acuosa

El biocarbón puede adsorber contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes en fase acuosa dependiendo de las propiedades fisicoquímicas del contaminante y del biocarbón. El pH de la solución es un parámetro importante que afecta el proceso de adsorción, las modificaciones del pH pueden propiciar disociaciones en los grupos funcionales de la superficie del biocarbón, lo cual puede afectar las interacciones electrostáticas entre el adsorbente y el adsorbato [82]. Las condiciones de producción (temperatura, tiempo, atmósfera y agentes de activación) afectarán las propiedades fisicoquímicas del biocarbón obteniendo influenciando la capacidad de adsorción y su afinidad por ciertos compuestos; la temperatura de pirólisis tiene un efecto importante en la capacidad de adsorción del biocarbón [83]. Estudios realizados sobre el uso de biocarbón para tratamiento de aguas en los últimos años se han centrado en la adsorción de compuestos orgánicos, inorgánicos e inmovilización de metales pesados, demostrando que el desempeño del biocarbón dependerá del área superficial, la

distribución y tamaño de poro, la química de superficie y la capacidad de intercambio de iones [10],[61],[81],[84]. Por ejemplo, el biocarbón para el tratamiento de aguas es una tecnología sostenible de bajo costo para la provisión de agua limpia, ya que permite la remoción de contaminantes como metales pesados y compuestos que le confieren color y olor al agua [85].

Estudios con biocarbón de tusa del fruto de palma han sido realizados para la adsorción de metales en agua como zinc, cobre y plomo, encontrando capacidades de adsorción máximas de 45,7 49,4 y 58,8 mg/g ( $Q_{\text{máx}}$  modelo de Langmuir) respectivamente, esta facultad de adsorber metales se confiere a la presencia de grupos funcionales oxigenados en la superficie del biocarbón [86]. La adsorción de biocarbón a partir de hojas de palma con mezcla de efluentes como el POME (Palm Oil Mill Effluent) ha reportado reducciones de DQO de 224 a 41 mg/g y color de 344 a 15 Pt-Co/g [87]. Sin embargo, el uso en aguas con sólidos suspendidos disminuyen la capacidad de adsorción debido a la obstrucción de los poros por causa de los sólidos presentes en las aguas [87]. Lawal *et al.* [88] encontraron que el biocarbón de hojas de palma tiene una capacidad de adsorción de fenol en un valor de 59,6 mg/g en aguas sintéticas, pero con pruebas en efluentes de planta de beneficio, esta capacidad se reduce a 18,5 mg/g. Lua (2020) [89] realizó estudios con biocarbón de cuesco de palma activado con vapor de agua para la adsorción de fenol encontrando capacidades de adsorción máximas de 168 mg/g bajo pirólisis al vacío, siendo estas adsorciones superiores a las reportadas por biocarbones producidos bajo atmósfera de nitrógeno. Respecto a la adsorción de metales pesados, estudios han reportado la adsorción de níquel ( $\text{Ni}^{+2}$ ) y cadmio ( $\text{Cd}^{+2}$ ) con biocarbón de cuesco de palma modificado con  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , encontrando porcentajes de remoción por encima del 80 % para ambos metales [90]. Además del cuesco, la tusa y las hojas de la palma de aceite, se han usado otras biomásas de este cultivo para la fabricación de adsorbentes. Por ejemplo, el lodo del fondo de las lagunas, las cenizas y el estípote, también han sido usados como precursores para la obtención de biocarbón y su aplicación en adsorción en fase acuosa. En la Tabla 1 se muestra que el contenido de ciertos compuestos como el Fe y el Ca en el precursor de carbono permite obtener biocarbones con características específicas para la adsorción de contaminantes.

### Adsorbente en fase gaseosa

La presencia de algunos compuestos químicos en el aire como el dióxido de carbono, metano, mercurio, dioxinas, benceno, entre otros, pueden afectar la salud de los seres vivos y promover la contaminación ambiental. Estudios realizados para remover estos compuestos han reportado que los agentes de activación química y física determinan

las propiedades fisicoquímicas idóneas del biocarbón para la adsorción de compuestos químicos [91],[92]. El estudio de los mecanismos de adsorción de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en biocarbón para la captura y almacenamiento de este gas ha sido analizado con el fin de mitigar el calentamiento global. Ding *et al.* (2020) [93] encontraron que el mecanismo que domina el proceso de adsorción de  $\text{CO}_2$  es la adsorción física, debido a que la alta área superficial y el volumen de poro le proveen más sitios de adsorción ricos en grupos funcionales oxigenados. De igual forma se han reportado estudios sobre la adsorción de sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ) por biocarbón de microalgas que reportan temperaturas óptimas de pirólisis de  $800\text{ }^\circ\text{C}$  para obtener capacidades de adsorción cercanas a  $5,8\text{ mg/g}$  [94],[95].

La remoción de metano, presente en corrientes gaseosas, con concentraciones menores al  $5\text{ \% v/v}$  es adecuado realizarla a través del uso de biocarbón ya que la eliminación de metano a estas concentraciones no es posible por combustión [96]. La adsorción de vapores de mercurio ( $\text{Hg}^0$ ) presente en gases de combustión ha reportado eficiencias de adsorción con biocarbón entre el  $40$  y  $65\text{ \%}$  [97]. Para la adsorción de dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), gas precursor de la lluvia ácida, se ha usado biocarbón de lodos de las lagunas de estabilización de las plantas de beneficio, encontrando capacidad de adsorción de  $16,65\text{ mg/g}$  a temperaturas de activación cercanas a los  $500\text{ }^\circ\text{C}$  [98]. El cuesco de palma ha sido utilizado para la fabricación de adsorbentes de dióxido de carbono encontrando capacidad de adsorción de  $0,46\text{ mmol/g}$  [99]. Este tipo de estudios muestran cómo es posible valorizar la biomasa residual de la palma de aceite y, a su vez, lograr soluciones para remediar y mitigar la contaminación ambiental.

## Biocarbón como bioenergía

La biomasa, subproducto de la extracción de aceite de palma, es una materia prima renovable que puede ser utilizada para la producción de bioenergía a través del proceso de pirólisis. Esto debido a que junto a la producción de biocarbón, también se puede obtener energía renovable a partir de los subproductos del proceso, es decir, bioaceite y gas de síntesis. La producción de energía es más favorable en la pirólisis rápida de biomasa debido a la mayor producción de gas de síntesis y bioaceite que pueden ser usados como sustituto de combustibles fósiles [31],[100]. Aunque el bioaceite tiene un contenido energético de  $14,78\text{ MJ/kg}$  menor que un combustible fósil como el diésel ( $45,6\text{ MJ/kg}$ ) [31], puede ser usado como una fuente alternativa de energía con el uso de procesos de refinación adicionales [101]. Estudios han encontrado que el bioaceite o alquitrán procedente de la pirólisis de biomasa de palma de aceite reporta poderes caloríficos entre  $10,49$ - $14,78\text{ MJ/kg}$ , mientras que el biocarbón de

esas biomásas reporta poderes caloríficos entre 20-30 MJ/kg [38],[102]. Anbisa *et al.* [103] han encontrado rendimientos en bioaceite de cuesco de palma del 47 % producido a 500 °C con tiempo de residencia de 60 min; sin embargo, este presenta alto contenido de agua (53 %). Teniendo en cuenta que los mayores componentes del bioaceite son agua, ácidos, alcoholes y fenoles, siendo el 2-6-dimethoxy fenol y 4-hydroxi ácido benzoico los que reportan mayor concentración [103] se considera que el bioaceite puede ser utilizado como materia prima para la obtención de productos químicos. Sin embargo, no puede ser combustionado directamente, sino que requiere de un pretratamiento para ser utilizado como sustituto de combustibles fósiles. Durante el proceso de pirólisis también se generan gases de síntesis que habitualmente son utilizados para proveer la energía a la reacción de pirólisis. La utilización de la biomasa de palma como fuente de bioenergía podría mejorar la participación de fuentes renovables en la matriz energética del país y a su vez contribuir a descarbonizar el sector energético.

## SopORTE para catalizadores

El biocarbón puede ser usado como catalizador para aplicaciones como la remediación del suelo, la síntesis de sustancias químicas, la producción de biodiésel y la degradación de contaminantes en el ambiente. Propiedades como el área superficial, los grupos funcionales oxigenados, la porosidad y el contenido de minerales, son factores importantes para el uso del biocarbón como catalizador. Por ejemplo, se ha utilizado el biocarbón resultante del proceso de gasificación de cuesco de palma para la fabricación de catalizadores para la obtención de biodiésel [104]–[106]. También, se han evaluado la remoción de óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) haciendo modificaciones químicas y físicas al biocarbón [107]. Otros estudios han evaluado la reducción catalítica del NO al  $\text{NO}_2$  y posterior captura de  $\text{NO}_2$  sobre biocarbón dopado con cerio (Ce), encontrando capacidades de adsorción de 75,59 mg/g; la remoción de los  $\text{NO}_x$  de los gases de combustión es importante debido a que son gases precursores de lluvia ácida, *smog* fotocatalítico y contribuyen al calentamiento global [108]. Cha *et al.* [82] estudiaron el uso de catalizadores a base de biocarbón para tratar los compuestos tóxicos de los procesos de pirólisis; el alquitrán generado durante la fabricación de biocarbón contienen compuestos como el benceno e hidrocarburos aromáticos policíclicos que son tóxicos y deben ser tratados, además, algunos compuestos presentes en el alquitrán bloquean las líneas de los reactores, dificultando su operación. Se ha buscado la forma de convertir estos compuestos en hidrógeno ( $\text{H}_2$ ) y monóxido de carbono (CO) mediante una reformación catalítica a través del uso de catalizadores dopados con níquel (Ni), metales alcalinos y dolomita. El biocarbón también se ha usado como soporte de catalizadores ácidos para las reacciones de esterificación y transesterificación para la producción de

esteres metílicos de ácidos grasos (biodiésel). Como resultado, se encontraron avances de la reacción por encima del 90 % y se observó que la actividad del catalizador no disminuía con la reutilización de este [109].

El biocarbón de tusa se ha usado para la fabricación de catalizadores sulfonados para reacciones de interesterificación libre de glicerol (reacción de ácidos grasos con acetato de metilo); el uso de estos adsorbentes para catálisis heterogénea muestra actividad catalítica, logrando rendimientos por encima del 50 % para esterres metílicos [110]. La síntesis de catalizadores sólidos ácidos a partir de tusa para la catálisis heterogénea de la reacción de transesterificación consta de dos pasos, la obtención del biocarbón y la sulfonación de este [111]. Catalizadores a partir de tusa de palma, dopados con dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) para la degradación de colorantes orgánicos, han mostrado un buen desempeño como precursor de carbono, logrando así una buena distribución del  $\text{TiO}_2$  y una degradación eficiente del colorante estudiado [112]. Aunque se reporta escasa bibliografía sobre la obtención de catalizadores a partir de la biomasa de palma de aceite, el uso de fuentes renovables para la producción de catalizadores carbonados es una prioridad [113]. Esta falta de información con respecto a catalizadores procedentes de biomasa de palma indica que sería interesante iniciar investigaciones en la producción de catalizadores carbonados a partir de biomasa de palma [113].

## Secuestrador de carbono

La investigación en tecnologías de mitigación y adaptación al cambio climático es importante, por lo que el uso del biocarbón como estrategia para la mitigación del cambio climático reporta beneficios principalmente por el secuestro rápido de carbono [114]. El proceso de pirólisis dentro del concepto de biorrefinería permite la producción de energía neutra en carbono mediante la incorporación del biocarbón al suelo, esta tecnología es catalogada como baja en carbono, con reporte de emisiones negativas de carbono (Figura 10). Cuando el biocarbón es retornado al suelo puede actuar como un sumidero de carbono, lo cual aumenta la fijación de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y también puede llegar a reducir las emisiones de metano ( $\text{CH}_4$ ) y óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) del suelo [115]-[117]. Durante el proceso de pirólisis, la fase sólida de la reacción es enriquecida con carbono, las relaciones H/C y O/C empiezan a disminuir y su valor es muy bajo comparado con la biomasa inicial. Estas relaciones de elementos son un indicativo del grado de carbonización, aromaticidad y estabilidad del biocarbón (Tabla 3); relaciones H/C indican un incremento de las estructuras aromáticas del biocarbón; relaciones mayores a 0,7 indican un biocarbón de baja estabilidad y pirólisis deficiente; para las relaciones O/C mayores a 0,4 la

estabilidad del biocarbón es baja [118]. Biocarbones con relaciones O/C por encima de 0,2 tienen vidas medias en el suelo entre 100 y 1.000 años, mientras que biocarbones con relación O/C menores a 0,2 tiene vida media mayor a 1.000 años [119]. La IBI (Iniciativa internacional del biocarbón) recomienda un valor máximo de 0,7 de la relación molar de H/C para poder diferenciar un biocarbón de una biomasa que no ha sido modificada [118].

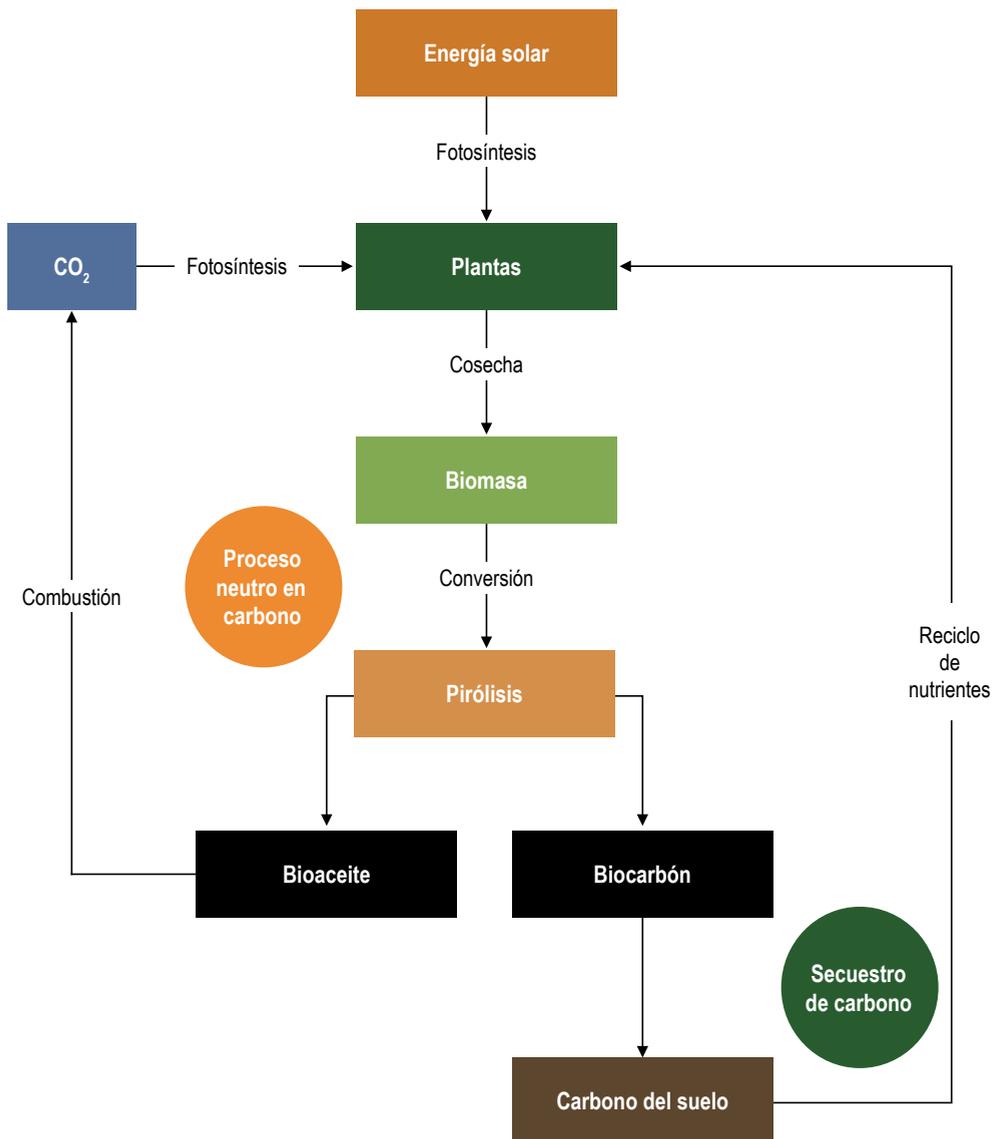


Figura 10. Concepto de biorrefinería con secuestro de carbono, adaptado de [120]

**Tabla 3.** Relaciones H/C y O/C, indicadores del grado de aromaticidad, grado de carbonización y estabilidad del biocarbón [119],[121].

Relación molar		Indicador
H/C	> 0,7	Biocarbón de baja estabilidad y pirólisis deficiente.
O/C	> 0,4	Estabilidad del biocarbón baja
O/C	< 0,2	Vida media mayor a 1.000 años
O/C	0,2<O/C<0,6	Vida media entre 100 y 1.000 años
O/C	> 0,6	Vida media menor a 100 años

El potencial de secuestro de carbono del biocarbón de cuesco de palma en base a 100 años es 0,398 t CO<sub>2</sub>/t biomasa, lo que lo convierte en un producto estratégico para mitigar el cambio climático y comercializar bonos de carbono [72]. El uso de carbones activados para la adsorción del CO<sub>2</sub> emitido por la quema de combustibles fósiles también abre una aplicación para el biocarbón de biomasa de palma; se ha encontrado adsorción de CO<sub>2</sub> (0,46 mmol/g) por biocarbón de cuesco de palma producido a 500 °C y flujo de nitrógeno 2 l/min [99]. Estas aplicaciones y estrategias para la mitigación del cambio climático convierten a la biomasa de palma en una materia prima idónea para la fabricación de carbones activados de bajo costo para la captura de CO<sub>2</sub> y la disminución de la concentración de GEI en la atmósfera.

## Otras aplicaciones

En los últimos años se ha reportado el uso de biocarbón como una materia prima para la fabricación de supercapacitores, nanotubos de carbono, grafenos y agentes colorantes [120]. Debido a que los materiales basados en biocarbón son fuentes de carbono amorfo, el biocarbón puede ser usado para fabricación de ánodos en baterías de iones de silicio [65]. También la capacidad que tiene el biocarbón para adsorción de metales puede ser usada para la fabricación de supercapacitores, estos se han fabricado a partir de biocarbón dopado con níquel, mostrando un mejoramiento en sus propiedades a partir de la modificación del biocarbón con metales [122],[123].

El biocarbón incorporado en materias de construcción puede secuestrar carbono y mejorar las propiedades mecánicas de estos materiales [124]. El uso de biocarbón en mezclas de concreto puede reducir las emisiones de GEI del sector industrial de la construcción, mejorando el desempeño ambiental del sector, que actualmente reporta un 7 % de participación en las emisiones globales de GEI a la atmósfera [65].

Cuando se usa en construcción de edificios; la adición de biocarbón en el cemento mejora las propiedades mecánicas de los materiales compuestos y tiene una oportunidad más amplia para crear nuevos materiales de construcción ecológicos con mayor resistencia a la compresión y a la tracción, y mayor impermeabilidad [125],[65],[126]. La incorporación del biocarbón como aditivo verde en la industria del cemento y la construcción genera una nueva aplicación de los productos derivados de la biomasa para la fabricación de nuevos productos funcionales con bajas huellas ambientales. El uso de biocarbón en el compostaje de materia orgánica mejora las propiedades del compost y los beneficios ambientales y agronómicos [65], ya que acelera la degradación de la materia orgánica, aumenta la diversidad biológica, reduce las pérdidas de nitrógeno, las emisiones de GEI del proceso de degradación y la disponibilidad de metales y contaminantes orgánicos e inorgánicos [125]. Debido a los actuales patrones de consumo de la humanidad, el manejo de los residuos orgánicos es un reto de la gestión ambiental; por tal razón, la búsqueda de tecnologías que permitan degradar de forma eficiente y rápida este tipo de residuos sin generar impactos ambientales adicionales es una necesidad.



## Sexta parte

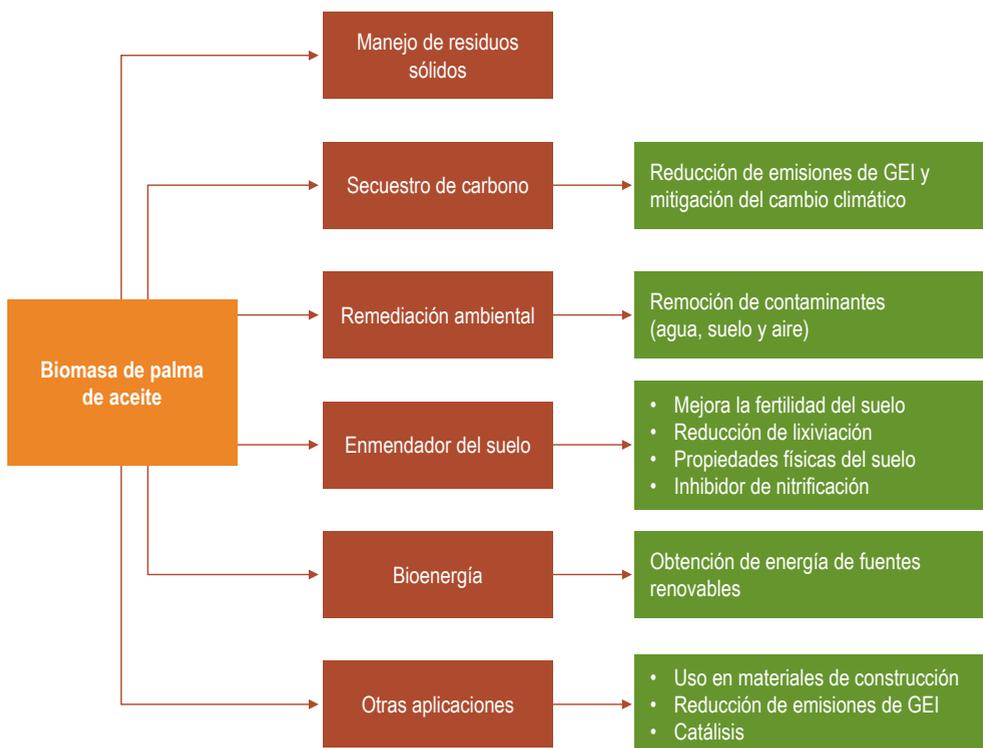


Foto: Contruccion por David Arturo Munar-Flórez

## Biocarbón y el concepto de economía circular



El biocarbón producido a partir de biomasa muestra gran variedad de aplicaciones, desde aquellas para la mitigación y adaptación al cambio climático hasta para la obtención de materiales novedosos como supercapacitores (Figura 11). El uso de los subproductos o desechos transformados mediante procesos termoquímicos como la pirólisis, permite la obtención de materiales y productos funcionales que se enmarcan en el concepto de economía circular. Procesos que buscan darle uso a los subproductos de procesos agroindustriales bajo un modelo de economía circular con cero desechos (Tabla 4).



**Figura 11.** Principales aplicaciones del biocarbón que podrían ser implementadas con biomasa de palma de aceite.

Con la búsqueda de una economía circular, también es posible encontrar estrategias para alcanzar economías bajas en carbono como el proceso de pirólisis, que es neutro en carbono, y si el biocarbón es aplicado al suelo, el modelo pasa a tener emisiones negativas en carbono, lo que quiere decir que con su uso se está secuestrando  $\text{CO}_2$  de manera rápida, que es una medida de mitigación al cambio climático [127]. Adicionalmente, las diferentes aplicaciones del biocarbón permiten aplicar el principio de la economía del átomo, donde la mayoría de los átomos de las materias primas

terminan siendo parte de productos deseados [128]. Un ejemplo claro de esto es la aplicación del biocarbón en el suelo, lo cual aparte de sus beneficios agronómicos, permite hacer un reciclaje de nutrientes donde se aprovecha de manera eficiente la materia prima. Respecto a la energía, también se está aprovechando la solar con el proceso de pirólisis, donde a partir de esta fuente primaria de energía, es posible obtener productos con poderes caloríficos como biogás, bioaceite y biocarbón (Figura 10).

**Tabla 4.** Procesos y aplicaciones más comunes encontradas con biomasa de palma de aceite.

Descripción del proceso	Biomasa de palma	Aplicación	Referencia
Biocarbón de liberación lenta de nitrógeno y fósforo y sumidero de carbono.	Cuesco de palma	Enmendador de suelo	[72]
Reducción de la acidez del suelo.	Cuesco de palma	Enmendador de suelo	[76]
Efecto de la aplicación de biocarbón en el rendimiento de arroz cultivado en suelos ácidos sulfatados.	Tusa	Enmendador del suelo	[78]
Degradación de herbicidas en el suelo.	Tusa	Enmendador del suelo	[79]
Mejorar la calidad del suelo.	Tusa, cuesco y fibra	Enmendador del suelo	[80]
Remoción de metales pesados en aguas.	Tusa	Adsorción en fase acuosa	[86]
Remoción de DQO, color y fenol en agua.	Hojas	Adsorción en fase acuosa	[87] [88]
Remociones de fenoles en agua.	Cuesco	Adsorción en fase acuosa	[89]
Adsorción de metales pesados.	Cuesco	Adsorción en fase acuosa	[90]
Adsorción de dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ).	Lodo de fondo	Adsorción en fase gaseosa	[98]
Adsorción de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ).	Cuesco	Adsorción en fase gaseosa	[99]
Fabricación de catalizadores sulfonados.	Tusa	Catálisis	[110]

Continúa

---

Descripción del proceso	Biomasa de palma	Aplicación	Referencia
Degradación de colorantes orgánicos.	Tusa	Catálisis	[112]
Mitigación del cambio climático.	Cuesco	Secuestro de carbono	[72]
Carbonización de cuesco de palma para un manejo adecuado de biomasa.	Cuesco	Manejo de residuos sólidos	[129]
Catalizador para la reacción de transesterificación de producción de biodiésel.	Cuesco	Catálisis	[130]

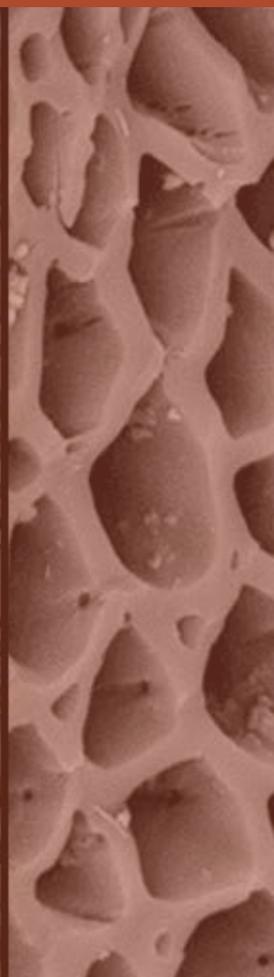


## Séptima parte



Foto: foto izquierda: Sirius Regenerative Solutions S.A.S. Zomac, foto derecha: David Munar & Mat&mpac Universidad de Medellín Nancy Acelas-Soto.

# Proveedores de tecnología para producción de biocarbón



La adopción de la tecnología de biocarbón en términos de su uso y escala varía ampliamente según los contextos locales y regionales, como el tipo de materia prima, la tecnología de producción, el entorno económico y el uso esperado del biocarbón. En la Tabla 5 se observa las plantas de pirólisis existentes a nivel mundial y el producto industrial deseado destacándose principalmente la producción de bioaceite y la presencia de esta industria en Europa y Norteamérica. También, el uso de diferentes tipos de reactor de pirólisis para la obtención de bioaceites, biocarbón, gas de síntesis y productos químicos. Para el 2015, se tenían 326 empresas relacionadas con la industria de biocarbón con mayor presencia en Norteamérica (48 %) y Europa (24 %), mientras que en Suramérica tan solo se reportó la presencia del 1 % de estas empresas con base en Brasil (Tabla 6). Los costos e impactos asociados con la tecnología de producción de biocarbón apenas están comenzando a explorarse. Una posible barrera financiera para el desarrollo y la transferencia de la tecnología podría ser: los altos costos de las plantas de pirólisis a gran escala, las inversiones necesarias en materias primas de biomasa, la infraestructura y el acceso al capital inicial [131].

**Tabla 5.** Plantas de pirólisis en todo el mundo [131].

Tipo de reactor	Organización	Ubicación	Capacidad (kg/h)	Producto deseado
Lecho fijo	Bio-alternative	USA	2.000	Biocarbón
Lecho fluidizado	THEE	Canadá	500	Gas de síntesis
	Dyna Motive		400	Bioaceite
	Best Energy	Australia	300	Bioaceite
	Wellman	UK	250	Bioaceite
	Union Fenosa	España	200	Bioaceite
	Zhejiang University	China	20	Bioaceite
	RTI	Canadá	20	Bioaceite
	Waterloo University	China	3	Bioaceite
	Zhejiang University		3	Bioaceite
Circulante de lecho fluidizado	Red Arrow, WI; Ensyn	Finlandia	1.700	Químicos
	Red Arrow, WI; Ensyn		1.500	Químicos
	Ensyn Engineering		30	Bioaceite
	VTT, Ensyn		20	Bioaceite
Cono giratorio	BTG	Holanda	200	Bioaceite
	Universidad Twente		10	Bioaceite

Continúa

Tipo de reactor	Organización	Ubicación	Capacidad (kg/h)	Producto deseado
Vacío	Pyrovac Laval University	Canadá	350 30	Bioaceite Bioaceite
Placa ablativa	PYTEC BBC PYEC	Alemania Canadá Alemania	250 10-15 15	Bioaceite Biocarbón Bioaceite
Vortex	Solar energy research Ins		30	Bioaceite
Otro tipo	Fortum Universidad de Zaragoza Georgia Tach Research Ins.	Finlandia	350 100 50	Bioaceite Gas de síntesis Bioaceite

**Tabla 6.** Cantidad de compañías relacionadas con la industria de biocarbón, por continente, año 2015 [132]

Continente	Empresas	Producción y venta de biocarbón	Equipos para biocarbón
África	9	7	4
Asia	50	36	20
Australia	26	18	14
Europa	79	46	37
Norteamérica	158	96	52
Suramérica	4	3	3
Total	326	206	130

Para el 2019, el 43 % de la producción mundial de biocarbón provino de Estados Unidos, siendo la agricultura (82,4 %), alimentos para animales, productos de salud y belleza los principales consumidores del biocarbón producido [132]. Se espera que el mercado de biocarbón aumente debido a su demanda agrícola para la mejora de la fertilidad de los suelos, la capacidad de retención de agua y el rendimiento de los cultivos. Para los próximos años se prevé un aumento en el uso de biocarbón para la alimentación animal debido al mejoramiento del contenido de grasa, la

calidad de los productos lácteos, la digestión de alimentos y la reducción de emisiones de GEI. Otro sector importante que impulsa el uso de biocarbón en Estados Unidos es el de tratamiento de aguas residuales [132]. Los productores de biocarbón en Estados Unidos están enfocados en integrarse a lo largo de la cadena de valor para aumentar el margen de beneficio y reducir la dependencia de proveedores de materias primas [132]. Las principales empresas de biocarbón están invirtiendo recursos en investigación y desarrollo para generar conciencia sobre los beneficios del biocarbón.

## Conclusiones y recomendaciones

Este boletín presentó aspectos técnicos que recogen la experiencia y el conocimiento de Cenipalma, además de otras entidades nacionales e internacionales, en lo relativo a la producción de biocarbón como una posibilidad de dar valor agregado a la biomasa residual de palma de aceite en Colombia. Las aplicaciones potenciales del biocarbón incluyen usos como adsorbente, precursor para catalizadores, remediación de suelos y secuestro de carbono, material para almacenamiento de CO<sub>2</sub>, supercapacitadores y aditivo para la industria de la construcción, entre otros. Las propiedades del biocarbón dependen de la materia prima y las condiciones de operación de los procesos de pirólisis y de modificación que se hagan a la superficie de la biomasa. Las modificaciones en el biocarbón mejoran las propiedades que son útiles para aplicaciones específicas. El biocarbón es un material renovable y su uso se enmarca en el concepto de economía circular. Sin embargo, es un producto que debe ser diseñado para aplicaciones en específico. La producción de biocarbón de la biomasa de palma trae consigo cobeneficios como la generación de energía renovable, combustibles líquidos, combustibles gaseosos y el almacenamiento de CO<sub>2</sub> de la atmósfera. En consecuencia, la producción de biocarbón es una estrategia llamativa para la mitigación del cambio climático y junto con un sector palmero sostenible se podría lograr a futuro una palmicultura baja en carbono.

Para identificar el potencial del proceso de pirólisis de biomasa de palma de aceite y mejorar su comprensión y comercialización exitosa, es necesario continuar investigando y contribuyendo a desarrollos tecnológicos de esta tecnología. En adición, se necesitan definir productos a base de biocarbón con propiedades funcionales y aplicaciones claras, y la generación de mercados para el biocarbón y los demás subproductos del proceso de pirólisis. La integración de los procesos de pirólisis a las plantas de beneficio de aceite de palma es un desafío técnico y económico dado que, hasta el momento, el enfoque de una planta de beneficio es netamente la extracción de aceite de palma y palmiste. Es por esto por lo que la selección de la tecnología de pirólisis más adecuada para la obtención del producto deseado (biocarbón, bioaceite o gas de síntesis), la materia prima y los parámetros operativos deben basarse en estudios técnicos, económicos y ambientales. La tecnología de pirólisis tiene el potencial de aplicarse en una gran diversidad de situaciones y, a través de este proceso, se puede obtener variedad de productos. Por lo tanto, es difícil explorar un diseño para todas las posibles aplicaciones. A continuación, se presentan algunos desafíos futuros para la tecnología de pirólisis de biomasa, acorde con lo descrito por [131].

- Comprender el funcionamiento adecuado de los reactores y los procesos de pirólisis.
- Desarrollar nuevos reactores que sean rentables y altamente eficientes.
- Desarrollar catalizadores para mejorar la producción y calidad del bioaceite.
- Desarrollar reactores con fuentes de energía renovable.
- Desarrollar procesos posteriores para mejorar las propiedades del biocarbón y bioaceites.
- Comprender las limitaciones y el potencial de mejora de la calidad de los productos obtenidos por pirólisis de biomasa.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Fondo de Fomento Palmero, administrado por Fedepalma, por la financiación de este estudio, a Sirius Regenerative Solutions S.A.S. Zomac y a la Doctora Nancy Acelas-Soto.

## Referencias

- [1] L.L. Bergeson, C.M. Auer, R. David Peveler, TSCA and the Regulation of Renewable Chemicals, *Ind. Biotechnol.* 8 (2012) 262–271. <https://doi.org/10.1089/ind.2012.1539>.
- [2] K. McCormick, N. Kautto, The Bioeconomy in Europe: An Overview, *Sustain.* 5 (2013) 2589–2608. <https://doi.org/10.3390/su5062589>.
- [3] A.S. Brandão, A. Gonçalves, J.M.R.C.A. Santos, Circular bioeconomy strategies: From scientific research to commercially viable products, *J. Clean. Prod.* 295 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126407>.
- [4] N.E. Ramírez-Contreas, Á.S. Silva-Ramírez, E.M. Garzón-González, E.E. Yáñez Angarita, *Boletín Técnico No. 30 Caracterización y manejo de subproductos del beneficio del fruto de palma de aceite*, Centro de Investigación en Palma de Aceite Cenipalma, 2011.
- [5] N. Ramirez-Contreas, A. Arévalo, and J. A. Garcia-Nuñez, “Inventario de la biomasa disponible en plantas de beneficio para su aprovechamiento y caracterización fisico-química de la tusa en Colombia \*,” pp. 41–54, 2015.
- [6] J.A. Garcia-nunez, N.E. Ramirez-contreras, D.T. Rodriguez, E. Silva-Lora, C.S. Frear, C. Stockle, M. Garcia-Perez, D. Tatiana, E. Silva-Lora, C. Stuart, C. Stockle, M. Garcia-Perez, *Resources, Conservation and Recycling Evolution of palm oil mills into bio-refineries: Literature review on current and potential uses of residual biomass and effluents*, “*Resources, Conserv. Recycl.* 110 (2016) 99–114. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.03.022>.
- [7] J.A. Garcia-nunez, D. Tatiana, C. Andr, N. Elizabeth, E. Eduardo, S. Lora, C. Stuart, C. Stockle, J. Amonette, M. Garcia-perez, *Biomass and Bioenergy Evaluation of alternatives for the evolution of palm oil mills into biore fi neries*, *Biomass and Bioenergy*. (2016). <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.05.020>.
- [8] N.E. Ramirez-Contreras, D.A. Munar-Florez, J.A. Garcia-Nuñez, M. Mosquera-Montoya, A.P.C. Faaij, *The GHG emissions and economic performance of the Colombian palm oil sector; current status and long-term perspectives*, *J. Clean. Prod.* 258 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120757>.
- [9] T.J. Purakayastha, T. Bera, D. Bhaduri, B. Sarkar, S. Mandal, P. Wade, S. Kumari, S. Biswas, M. Menon, H. Pathak, D.C.W. Tsang, *A review on biochar modulated soil condition improvements and nutrient dynamics concerning crop yields: Pathways to climate change mitigation and global food security*, *Chemosphere.* 227 (2019) 345–365. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.170>.
- [10] W. Xiang, X. Zhang, J. Chen, W. Zou, F. He, X. Hu, D.C.W. Tsang, Y.S. Ok, B. Gao, *Biochar technology in wastewater treatment: A critical review*, *Chemosphere.* 252 (2020) 126539. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126539>.

- [11] S.H. Kong, S.K. Loh, R.T. Bachmann, S.A. Rahim, J. Salimon, Biochar from oil palm biomass: A review of its potential and challenges, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 39 (2014) 729–739. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.107>.
- [12] E.C. Hammer, Z. Balogh-Brunstad, I. Jakobsen, P.A. Olsson, S.L.S. Stipp, M.C. Rillig, A mycorrhizal fungus grows on biochar and captures phosphorus from its surfaces, *Soil Biol. Biochem.* 77 (2014) 252–260. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.06.012>.
- [13] H. Zheng, Z. Wang, X. Deng, S. Herbert, B. Xing, Impacts of adding biochar on nitrogen retention and bioavailability in agricultural soil, *Geoderma*. 206 (2013) 32–39. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.04.018>.
- [14] X. Tan, Y. Liu, G. Zeng, X. Wang, X. Hu, Y. Gu, Z. Yang, Chemosphere Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions, *Chemosphere*. 125 (2015) 70–85. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.12.058>.
- [15] K. Qian, A. Kumar, H. Zhang, D. Bellmer, R. Huhnke, Recent advances in utilization of biochar, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 42 (2015) 1055–1064. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.074>.
- [16] M. de Comercio, Estrategia Nacional de Economía Circular, n.d.
- [17] Founding Partners of the Ellen MacArthur Foundation, Towards the circular economy. Economic and business rationale for an accelerated transition, 2013.
- [18] J. A. Garcia-Nunez *et al.*, “Evaluation of alternatives for the evolution of palm oil mills into biorefineries,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 95, pp. 310–329, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.biombioe.2016.05.020.
- [19] D. T. Rodríguez, N. E. Ramírez, and J. A. García, “Evaluación de la incidencia de la producción de compost, usando biomasa de la planta de beneficio, en la huella de carbono del aceite de palma,” *Rev. Palmas*, vol. 36, no. 1, pp. 27–39, 2015.
- [20] A. Demirbas, M.F. Demirbas, Biorefineries, in: Springer Science & Business Media, 2010: pp. 159–181. [https://doi.org/10.1007/978-1-84996-050-2\\_7](https://doi.org/10.1007/978-1-84996-050-2_7).
- [21] J. A. Garcia N, M. M. Cardenas M, and E. E. Yañez A, “Generación y uso de biomasa en plantas de beneficio de palma de aceite en Colombia,” vol. 31, no. 2, pp. 41–48, 2010
- [22] W.C. Lim, C. Srinivasakannan, N. Balasubramanian, Activation of palm shells by phosphoric acid impregnation for high yielding activated carbon, *J. Anal. Appl. Pyrolysis*. 88 (2010) 181–186. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2010.04.004>.
- [23] E.I. Wiloso, R. Heijungs, G. Huppes, K. Fang, Effect of biogenic carbon inventory on the life cycle assessment of bioenergy: Challenges to the neutrality assumption, *J. Clean. Prod.* 125 (2016) 78–85. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.096>.
- [24] P. Shrivastava, P. Khongphakdi, A. Palamanit, A. Kumar, P. Tekasakul, Investigation of physicochemical properties of oil palm biomass for evaluating potential of biofuels

- production via pyrolysis processes, *Biomass Convers. Biorefinery*. (2020). <https://doi.org/10.1007/s13399-019-00596-x>.
- [25] W. Jong and J. Ommen, *Biomass as a Sustainable Energy Source for the Future*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc, 2014.
- [26] D. Angin, Effect of pyrolysis temperature and heating rate on biochar obtained from pyrolysis of safflower seed press cake, *Bioresour. Technol.* 128 (2013) 593–7. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.150>.
- [27] A. Urien, “Obtención de biocarbonos y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual,” *tesis de grado*, 2013. [http://digital.csic.es/bitstream/10261/80225/1/BIOCARBONES\\_CENIM\\_CSIC.pdf](http://digital.csic.es/bitstream/10261/80225/1/BIOCARBONES_CENIM_CSIC.pdf) (accessed Feb. 15, 2015).
- [28] International Biochar Initiative | International Biochar Initiative, (n.d.). <http://www.biochar-international.org/> (accessed February 6, 2015).
- [29] J. Lehmann, *Biochar for Environmental Management*, Routledge, 2012. <https://doi.org/10.4324/9781849770552>.
- [30] Y.H. Chan, K.W. Cheah, B.S. How, A.C.M. Loy, M. Shahbaz, H.K.G. Singh, N.R. Yusuf, A.F.A. Shuhaili, S. Yusup, W.A.W.A.K. Ghani, J. Rambli, Y. Kansha, H.L. Lam, B.H. Hong, S.L. Ngan, An overview of biomass thermochemical conversion technologies in Malaysia, *Sci. Total Environ.* 680 (2019) 105–123. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.211>.
- [31] R. Kumar, V. Strezov, H. Weldekidan, J. He, S. Singh, T. Kan, B. Dastjerdi, Ligno-cellulose biomass pyrolysis for bio-oil production: A review of biomass pre-treatment methods for production of drop-in fuels, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 123 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109763>.
- [32] R. Bakker, H. Elbersen, Managing ash content and quality in herbaceous biomass: an analysis from plant to product, 14th Eur. Biomass Conf. Exhib. Paris, Fr. (2005) 1–4.
- [33] E. Heinzle, A. P. Biwer, and C. L. Cooney, *Development of Sustainable Bioprocesses*, vol. 6. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2006.
- [34] S. Lee, J. G. Speight, and S. K. Loyalka, Eds., *Handbook of Alternative Fuel Technologies*. CRC Press, 2014.
- [35] B. Balagurumurthy, R. Singh, T. Bhaskar, Recent Advances in Thermo-Chemical Conversion of Biomass, Elsevier B.V., 2015. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63289-0.00004-1>.
- [36] D.K. Seo, S.S. Park, J. Hwang, T.U. Yu, Study of the pyrolysis of biomass using thermo-gravimetric analysis (TGA) and concentration measurements of the evolved species, *J. Anal. Appl. Pyrolysis.* 89 (2010) 66–73. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2010.05.008>.

- [37] A. Colantoni, N. Evic, R. Lord, S. Retschitzegger, A.R. Proto, F. Gallucci, D. Monarca, Characterization of biochars produced from pyrolysis of pelletized agricultural residues, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 64 (2016) 187–194. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.003>.
- [38] F. Abnisa, A. Arami-Niya, W.M.A.W. Daud, J.N. Sahu, Characterization of Bio-oil and Bio-char from Pyrolysis of Palm Oil Wastes, *Bioenergy Res.* 6 (2013) 830–840. <https://doi.org/10.1007/s12155-013-9313-8>.
- [39] R. Singh, A. Prakash, B. Balagurumurthy, T. Bhaskar, Hydrothermal Liquefaction of Biomass, (2015) 269–291. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63289-0.00010-7>.
- [40] L. Qin, W.-C. Li, J.-Q. Zhu, B.-Z. Li, Y.-J. Yuan, Hydrolysis of Lignocellulosic Biomass to Sugars, in: 2017: pp. 3–41. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-4172-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-981-10-4172-3_1).
- [41] R. C. Brown, *Thermochemical Processing of Biomass: conversion into fuels, chemicals and power*. Wiley, 2019.
- [42] T. Processing, *Thermochemical Processing of Biomass*, n.d.
- [43] Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía, *Biomasa Gasificación*, 2007.
- [44] Argonne GREET Model, (n.d.). <https://greet.es.anl.gov/> (accessed March 31, 2015).
- [45] Z. Zhou, D. Liu, X. Zhao, Conversion of lignocellulose to biofuels and chemicals via sugar platform: An updated review on chemistry and mechanisms of acid hydrolysis of lignocellulose, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 146 (2021) 111169. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111169>.
- [46] I. Kurnia, A. Yoshida, N. Chaihad, A. Bayu, Y. Kasai, A. Abudula, G. Guan, Hydrolysis of cellulose and woody biomass over sustainable weak-acid carbon catalysts from alkaline lignin, *Fuel Process. Technol.* 196 (2019) 106175. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.106175>.
- [47] B. Meryemoglu, Biomass hydrolysis with phosphotungstic acid, *Catal. Commun.* 149 (2021) 106248. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2020.106248>.
- [48] M.K. Bahng, C. Mukarakate, D.J. Robichaud, M.R. Nimlos, Current technologies for analysis of biomass thermochemical processing: A review, *Anal. Chim. Acta.* 651 (2009) 117–138. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2009.08.016>.
- [49] V. Dhyan, T. Bhaskar, Pyrolysis of biomass, *Biomass, Biofuels, Biochem. Biofuels Altern. Feed. Convers. Process. Prod. Liq. Gaseous Biofuels.* (2019) 217–244. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816856-1.00009-9>.
- [50] P. Debiagi, G. Gentile, A. Cuoci, A. Frassoldati, E. Ranzi, T. Faravelli, A predictive model of biochar formation and characterization, *J. Anal. Appl. Pyrolysis.* 134 (2018) 326–335. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.06.022>.

- [51] J.A. Garcia-Nunez, M.R. Pelaez-Samaniego, M.E. Garcia-Perez, I. Fonts, J. Abrego, R.J.M. Westerhof, M. Garcia-Perez, Historical Developments of Pyrolysis Reactors: A Review, 2017. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b00641>.
- [52] F.X. Collard, M. Carrier, J.F. Görgens, Fractionation of Lignocellulosic Material With Pyrolysis Processing, Biomass Fractionation Technol. a Lignocellul. Feed. Based Bio-refinery. (2016) 81–101. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802323-5.00004-9>.
- [53] A. Arami-Niya, W.M.A.W. Daud, F.S. Mjalli, Using granular activated carbon prepared from oil palm shell by ZnCl<sub>2</sub> and physical activation for methane adsorption, J. Anal. Appl. Pyrolysis. 89 (2010) 197–203. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2010.08.006>.
- [54] A.K. Sakhiya, P. Baghel, A. Anand, V.K. Vijay, P. Kaushal, A comparative study of physical and chemical activation of rice straw derived biochar to enhance Zn<sup>2+</sup> adsorption, Bioresour. Technol. Reports. 15 (2021) 100774. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100774>.
- [55] S. Biswas, H. Siddiqi, B.C. Meikap, T.K. Sen, M. Khiadani, Preparation and Characterization of Raw and Inorganic Acid-Activated Pine Cone Biochar and Its Application in the Removal of Aqueous-Phase Pb<sup>2+</sup> Metal Ions by Adsorption, Water. Air. Soil Pollut. 231 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11270-019-4375-7>.
- [56] U. Iriarte-Velasco, I. Sierra, L. Zudaire, J.L. Ayastuy, Preparation of a porous biochar from the acid activation of pork bones, Food Bioprod. Process. 98 (2016) 341–353. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2016.03.003>.
- [57] Q. Han, J. Wang, B.A. Goodman, J. Xie, Z. Liu, High adsorption of methylene blue by activated carbon prepared from phosphoric acid treated eucalyptus residue, Powder Technol. 366 (2020) 239–248. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.02.013>.
- [58] L. Cao, I.K.M. Yu, D.C.W. Tsang, S. Zhang, Y.S. Ok, E.E. Kwon, H. Song, C.S. Poon, Phosphoric acid-activated wood biochar for catalytic conversion of starch-rich food waste into glucose and 5-hydroxymethylfurfural, Bioresour. Technol. 267 (2018) 242–248. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.07.048>.
- [59] L. Sun, D. Chen, S. Wan, Z. Yu, Performance, kinetics, and equilibrium of methylene blue adsorption on biochar derived from eucalyptus saw dust modified with citric, tartaric, and acetic acids, Bioresour. Technol. 198 (2015) 300–308. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.09.026>.
- [60] O. Oginni, K. Singh, G. Oporto, B. Dawson-Andoh, L. McDonald, E. Sabolsky, Influence of one-step and two-step KOH activation on activated carbon characteristics, Bioresour. Technol. Reports. 7 (2019) 100266. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100266>.
- [61] X. Li, C. Wang, J. Zhang, J. Liu, B. Liu, G. Chen, Preparation and application of magnetic biochar in water treatment: A critical review, Sci. Total Environ. 711 (2020) 134847. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134847>.

- [62] X. Liu, M. Gao, W. Qiu, Z.H. Khan, N. Liu, L. Lin, Z. Song, Fe–Mn–Ce oxide-modified biochar composites as efficient adsorbents for removing As(III) from water: adsorption performance and mechanisms, *Environ. Sci. Pollut. Res.* 26 (2019) 17373–17382. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04914-8>.
- [63] N.A. Zubbri, A.R. Mohamed, N. Kamiuchi, M. Mohammadi, Enhancement of CO<sub>2</sub> adsorption on biochar sorbent modified by metal incorporation, *Environ. Sci. Pollut. Res.* 27 (2020) 11809–11829. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07734-3>.
- [64] J. Liu, J. Jiang, Y. Meng, A. Aihemaiti, Y. Xu, H. Xiang, Y. Gao, X. Chen, Preparation, environmental application and prospect of biochar-supported metal nanoparticles: A review, *J. Hazard. Mater.* 388 (2020) 122026. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122026>.
- [65] A.K. Sakhiya, A. Anand, P. Kaushal, Production, activation, and applications of biochar in recent times, Springer Singapore, 2020. <https://doi.org/10.1007/s42773-020-00047-1>.
- [66] H. Xu, A. Cai, D. Wu, G. Liang, J. Xiao, M. Xu, G. Colinet, W. Zhang, Effects of biochar application on crop productivity, soil carbon sequestration, and global warming potential controlled by biochar C:N ratio and soil pH: A global meta-analysis, *Soil Tillage Res.* 213 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105125>.
- [67] A.R. Hidayu, N.F. Mohamad, S. Matali, A.S.A.K. Sharifah, Characterization of activated carbon prepared from oil palm empty fruit bunch using BET and FT-IR techniques, *Procedia Eng.* 68 (2013) 379–384. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.12.195>.
- [68] A. Tomczyk, Z. Sokołowska, P. Boguta, Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects, *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 19 (2020) 191–215. <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3>.
- [69] L. Rodriguez Ortiz, E. Torres, D. Zalazar, H. Zhang, R. Rodriguez, G. Mazza, Influence of pyrolysis temperature and bio-waste composition on biochar characteristics, *Renew. Energy.* 155 (2020) 837–847. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.181>.
- [70] H. Yu, W. Zou, J. Chen, H. Chen, Z. Yu, J. Huang, H. Tang, X. Wei, B. Gao, Biochar amendment improves crop production in problem soils: A review, *J. Environ. Manage.* 232 (2019) 8–21. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.117>.
- [71] M. Kamali, D. Jahaninafard, A. Mostafaie, M. Davarazar, A.P.D. Gomes, L.A.C. Tarelho, R. Dewil, T.M. Aminabhavi, Scientometric analysis and scientific trends on biochar application as soil amendment, *Chem. Eng. J.* 395 (2020) 125128. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125128>.
- [72] E.L. Dominguez, A. Uttran, S.K. Loh, M.-H. Manero, R. Upperton, M. Idris Tanimu, R. Thomas Bachmann, Characterisation of industrially produced oil palm kernel shell biochar and its potential as slow release nitrogen-phosphate fertilizer and carbon sink, *Mater. Today Proc.* (2020). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.143>.

- [73] P. Campos, A.Z. Miller, H. Knicker, M.F. Costa-Pereira, A. Merino, J.M. De la Rosa, Chemical, physical and morphological properties of biochars produced from agricultural residues: Implications for their use as soil amendment, *Waste Manag.* 105 (2020) 256–267. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.02.013>.
- [74] R. Hussain, K. Ravi, A. Garg, Influence of biochar on the soil water retention characteristics (SWRC): Potential application in geotechnical engineering structures, *Soil Tillage Res.* 204 (2020) 104713. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104713>.
- [75] Y. Liu, K. Guo, Y. Zhao, S. Li, Q. Wu, C. Liang, X. Sun, Q. Xu, J. Chen, H. Qin, Change in composition and function of microbial communities in an acid bamboo (*Phyllostachys praecox*) plantation soil with the addition of three different biochars, *For. Ecol. Manage.* 473 (2020) 118336. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118336>.
- [76] V. Martinsen, V. Alling, N.L. Nurida, J. Mulder, S.E. Hale, C. Ritz, D.W. Rutherford, A. Heikens, G.D. Breedveld, G. Cornelissen, pH effects of the addition of three biochars to acidic Indonesian mineral soils, *Soil Sci. Plant Nutr.* 61 (2015) 821–834. <https://doi.org/10.1080/00380768.2015.1052985>.
- [77] R. Chintala, J. Mollinedo, T.E. Schumacher, D.D. Malo, J.L. Julson, Effect of biochar on chemical properties of acidic soil, *Arch. Agron. Soil Sci.* 60 (2014) 393–404. <https://doi.org/10.1080/03650340.2013.789870>.
- [78] R.A. Bakar, Z.A. Razak, S.H. Ahmad, B.J. Seh-Bardan, L.C. Tsong, C.P. Meng, Influence of Oil Palm Empty Fruit bunch Biochar on floodwater pH and yield components of Rice cultivated on acid Sulphate soil under Rice Intensification practices, *Plant Prod. Sci.* 18 (2015) 491–500. <https://doi.org/10.1626/pps.18.491>.
- [79] S. Yavari, N.B. Sapari, A. Malakahmad, S. Yavari, Degradation of imazapic and imazapyr herbicides in the presence of optimized oil palm empty fruit bunch and rice husk biochars in soil, *J. Hazard. Mater.* 366 (2019) 636–642. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.12.022>.
- [80] K.E. Anyaoha, R. Sakrabani, K. Patchigolla, A.M. Mouazen, Critical evaluation of oil palm fresh fruit bunch solid wastes as soil amendments: Prospects and challenges, *Resour. Conserv. Recycl.* 136 (2018) 399–409. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.022>.
- [81] Z. Luo, B. Yao, X. Yang, L. Wang, Z. Xu, X. Yan, L. Tian, H. Zhou, Y. Zhou, Novel insights into the adsorption of organic contaminants by biochar: A review, *Chemosphere.* 287 (2022) 132113. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132113>.
- [82] J.S. Cha, S.H. Park, S.C. Jung, C. Ryu, J.K. Jeon, M.C. Shin, Y.K. Park, Production and utilization of biochar: A review, *J. Ind. Eng. Chem.* 40 (2016) 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2016.06.002>.
- [83] W. Suliman, J.B. Harsh, N.I. Abu-Lail, A.M. Fortuna, I. Dallmeyer, M. Garcia-Perez, Modification of biochar surface by air oxidation: Role of pyrolysis temperature, *Biomass and Bioenergy.* 85 (2016) 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.11.030>.

- [84] D.A. Munar-Florez, D.A. Varón-Cardenas, N.E. Ramírez-Contreras, J.A. García-Núñez, Adsorption of ammonium and phosphates by biochar produced from oil palm shells: Effects of production conditions, *Results Chem.* 3 (2021) 100119. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2021.100119>.
- [85] N.L. Panwar, A. Pawar, B.L. Salvi, Comprehensive review on production and utilization of biochar, *SN Appl. Sci.* 1 (2019) 1–19. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0172-6>.
- [86] A.W. Samsuri, F. Sadegh-Zadeh, B.J. Seh-Bardan, Characterization of biochars produced from oil palm and rice husks and their adsorption capacities for heavy metals, *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 11 (2014) 967–976. <https://doi.org/10.1007/s13762-013-0291-3>.
- [87] A.A. Lawal, M.A. Hassan, M.A.A. Farid, T.A.T. Yasim-Anuar, M.Z.M. Yusoff, M.R. Zakaria, A.M. Roslan, M.N. Mokhtar, Y. Shirai, Production of biochar from oil palm frond by steam pyrolysis for removal of residual contaminants in palm oil mill effluent final discharge, *J. Clean. Prod.* 265 (2020) 121643. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121643>.
- [88] A.A. Lawal, M.A. Hassan, M.A. Ahmad Farid, T.A.T. Yasim-Anuar, M.Z. Mohd Yusoff, M.R. Zakaria, A.M. Roslan, M.N. Mokhtar, Y. Shirai, One-step steam pyrolysis for the production of mesoporous biochar from oil palm frond to effectively remove phenol in facultatively treated palm oil mill effluent, *Environ. Technol. Innov.* 18 (2020) 100730. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100730>.
- [89] A.C. Lua, A detailed study of pyrolysis conditions on the production of steam-activated carbon derived from oil-palm shell and its application in phenol adsorption, *Biomass Convers. Biorefinery.* 10 (2020) 523–533. <https://doi.org/10.1007/s13399-019-00447-9>.
- [90] A. Herrera-Barros, C. Tejada-Tovar, A. Villabona-Ortiz, A.D. González-Delgado, J. Benitez-Monroy, Cd (II) and Ni (II) uptake by novel biosorbent prepared from oil palm residual biomass and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles, *Sustain. Chem. Pharm.* 15 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.scp.2020.100216>.
- [91] Y. Chen, X. Zhang, W. Chen, H. Yang, H. Chen, The structure evolution of biochar from biomass pyrolysis and its correlation with gas pollutant adsorption performance, *Bioresour. Technol.* 246 (2017) 101–109. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.138>.
- [92] X. Zhou, T.B. Moghaddam, M. Chen, S. Wu, S. Adhikari, Biochar removes volatile organic compounds generated from asphalt, *Sci. Total Environ.* 745 (2020) 141096. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141096>.
- [93] S. Ding, Y. Liu, Adsorption of CO<sub>2</sub> from flue gas by novel seaweed-based KOH-activated porous biochars, *Fuel.* 260 (2020) 116382. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116382>.
- [94] X. Han, H. Chen, Y. Liu, J. Pan, Study on removal of gaseous hydrogen sulfide based on macroalgae biochars, *J. Nat. Gas Sci. Eng.* 73 (2020) 103068. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.103068>.

- [95] J. Kanjanarong, B.S. Giri, D.P. Jaisi, F.R. Oliveira, P. Boonsawang, S. Chaiprapat, R.S. Singh, A. Balakrishna, S.K. Khanal, Removal of hydrogen sulfide generated during anaerobic treatment of sulfate-laden wastewater using biochar: Evaluation of efficiency and mechanisms, *Bioresour. Technol.* 234 (2017) 115–121. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.009>.
- [96] H. La, J.P.A. Hettiaratchi, G. Achari, The influence of biochar and compost mixtures, water content, and gas flow rate, on the continuous adsorption of methane in a fixed bed column, *J. Environ. Manage.* 233 (2019) 175–183. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.015>.
- [97] Q. Shi, Y. Wang, X. Zhang, B. Shen, F. Wang, Y. Zhang, Hierarchically porous biochar synthesized with CaCO<sub>3</sub> template for efficient Hg<sup>0</sup> adsorption from flue gas, *Fuel Process. Technol.* 199 (2020) 106247. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.106247>.
- [98] N. Ibrahım, S. Sethupathi, C.L. Goh, M.J.K. Bashir, W. Ahmad, Optimization of activated palm oil sludge biochar preparation for sulphur dioxide adsorption, *J. Environ. Manage.* 248 (2019) 109302. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109302>.
- [99] A. Promraksa, N. Rakmak, Biochar production from palm oil mill residues and application of the biochar to adsorb carbon dioxide, *Heliyon.* 6 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04019>.
- [100] M. Aziz, T. Kurniawan, T. Oda, T. Kashiwagi, Advanced power generation using biomass wastes from palm oil mills, *Appl. Therm. Eng.* 114 (2016) 1378–1386. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.031>.
- [101] X. Chen, Q. Che, S. Li, Z. Liu, H. Yang, Y. Chen, X. Wang, J. Shao, H. Chen, Recent developments in lignocellulosic biomass catalytic fast pyrolysis: Strategies for the optimization of bio-oil quality and yield, *Fuel Process. Technol.* 196 (2019) 106180. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.106180>.
- [102] F.B. Ahmad, Z. Zhang, W.O.S. Doherty, I.M. O’Hara, The outlook of the production of advanced fuels and chemicals from integrated oil palm biomass biorefinery, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 109 (2019) 386–411. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.009>.
- [103] F. Abnisa, W.M. a. W. Daud, W.N.W. Husin, J.N. Sahu, Utilization possibilities of palm shell as a source of biomass energy in Malaysia by producing bio-oil in pyrolysis process, *Biomass and Bioenergy.* 35 (2011) 1863–1872. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.033>.
- [104] M.D. Kostić, A. Bazargan, O.S. Stamenković, V.B. Veljković, G. McKay, Optimization and kinetics of sunflower oil methanolysis catalyzed by calcium oxide-based catalyst derived from palm kernel shell biochar, *Fuel.* 163 (2016) 304–313. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.09.042>.

- [105] T. Do Minh, J. Song, A. Deb, L. Cha, V. Srivastava, M. Sillanpää, Biochar based catalysts for the abatement of emerging pollutants: A review, *Chem. Eng. J.* 394 (2020) 124856. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124856>.
- [106] J. Lee, K.H. Kim, E.E. Kwon, Biochar as a Catalyst, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 77 (2017) 70–79. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.002>.
- [107] Y.B. Jo, J.S. Cha, J.H. Ko, M.C. Shin, S.H. Park, J.K. Jeon, S.S. Kim, Y.K. Park, NH<sub>3</sub> selective catalytic reduction (SCR) of nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) over activated sewage sludge char, *Korean J. Chem. Eng.* 28 (2011) 106–113. <https://doi.org/10.1007/s11814-010-0283-7>.
- [108] S.I. Anthonysamy, P. Lahijani, M. Mohammadi, A.R. Mohamed, Low temperature adsorption of nitric oxide on cerium impregnated biomass-derived biochar, *Korean J. Chem. Eng.* 37 (2020) 130–140. <https://doi.org/10.1007/s11814-019-0405-9>.
- [109] J.R. Kastner, J. Miller, D.P. Geller, J. Locklin, L.H. Keith, T. Johnson, Catalytic esterification of fatty acids using solid acid catalysts generated from biochar and activated carbon, *Catal. Today.* 190 (2012) 122–132. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2012.02.006>.
- [110] W.Y. Wong, S. Lim, Y.L. Pang, S.H. Shuit, W.H. Chen, K.T. Lee, Synthesis of renewable heterogeneous acid catalyst from oil palm empty fruit bunch for glycerol-free biodiesel production, *Sci. Total Environ.* 727 (2020) 138534. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138534>.
- [111] S. Lim, C.Y. Yap, Y.L. Pang, K.H. Wong, Biodiesel synthesis from oil palm empty fruit bunch biochar derived heterogeneous solid catalyst using 4-benzenediazonium sulfonate, *J. Hazard. Mater.* 390 (2020) 121532. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121532>.
- [112] Y.L. Pang, S. Lim, R.K.L. Lee, Enhancement of sonocatalytic degradation of organic dye by using titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>)/activated carbon (AC) derived from oil palm empty fruit bunch, *Environ. Sci. Pollut. Res.* 27 (2020) 34638–34652. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05373-x>.
- [113] M.J. Hazlett, R.A. Arnold, V. Montes, Y. Xiao, J.M. Hill, Carbonaceous Catalysts from Biomass, 2019. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-3768-0\\_7](https://doi.org/10.1007/978-981-13-3768-0_7).
- [114] S. Jung, Y.K. Park, E.E. Kwon, Strategic use of biochar for CO<sub>2</sub> capture and sequestration, *J. CO<sub>2</sub> Util.* 32 (2019) 128–139. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2019.04.012>.
- [115] P. Wu, S.T. Ata-Ul-Karim, B.P. Singh, H. Wang, T. Wu, C. Liu, G. Fang, D. Zhou, Y. Wang, W. Chen, A scientometric review of biochar research in the past 20 years (1998–2018), *Biochar.* 1 (2019) 23–43. <https://doi.org/10.1007/s42773-019-00002-9>.
- [116] A. Hansson, S. Haikola, M. Fridahl, P. Yanda, E. Mabhuye, N. Pauline, Biochar as multi-purpose sustainable technology: experiences from projects in Tanzania, Springer Netherlands, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00809-8>.

- [117] H. Liu, H. Li, A. Zhang, M.A. Rahaman, Z. Yang, Inhibited effect of biochar application on N<sub>2</sub>O emissions is amount and time-dependent by regulating denitrification in a wheat-maize rotation system in North China, *Sci. Total Environ.* 721 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137636>.
- [118] D.K. Gupta, C.K. Gupta, R. Dubey, R.K. Fagodiya, G. Sharma, K. A., M.B. Noor Mohamed, R. Dev, A.K. Shukla, Role of Biochar in Carbon Sequestration and Greenhouse Gas Mitigation, in: *Biochar Appl. Agric. Environ. Manag.*, Springer International Publishing, Cham, 2020: pp. 141–165. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-40997-5\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-40997-5_7).
- [119] T.M. Abdel-Fattah, M.E. Mahmoud, S.B. Ahmed, M.D. Huff, J.W. Lee, S. Kumar, Biochar from woody biomass for removing metal contaminants and carbon sequestration, *J. Ind. Eng. Chem.* (2013). <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2014.06.030>.
- [120] S. Nanda, A.K. Dalai, F. Berruti, J.A. Kozinski, Biochar as an Exceptional Bioresource for Energy, Agronomy, Carbon Sequestration, Activated Carbon and Specialty Materials, *Waste and Biomass Valorization.* 7 (2016) 201–235. <https://doi.org/10.1007/s12649-015-9459-z>.
- [121] K.T. Klasson, Biochar characterization and a method for estimating biochar quality from proximate analysis results, *Biomass and Bioenergy.* 96 (2017) 50–58. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.10.011>.
- [122] D. Li, L. Zhao, X. Cao, Z. Xiao, H. Nan, H. Qiu, Nickel-catalyzed formation of mesoporous carbon structure promoted capacitive performance of exhausted biochar, *Chem. Eng. J.* 406 (2021) 126856. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126856>.
- [123] N. Zhao, S. Wu, C. He, C. Shi, E. Liu, X. Du, J. Li, Hierarchical porous carbon with graphitic structure synthesized by a water soluble template method, *Mater. Lett.* 87 (2012) 77–79. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2012.07.085>.
- [124] L. Wang, L. Chen, D.C.W. Tsang, B. Guo, J. Yang, Z. Shen, D. Hou, Y.S. Ok, C.S. Poon, Biochar as green additives in cement-based composites with carbon dioxide curing, *J. Clean. Prod.* 258 (2020) 120678. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120678>.
- [125] S. Sri Shalini, K. Palanivelu, A. Ramachandran, V. Raghavan, Biochar from biomass waste as a renewable carbon material for climate change mitigation in reducing greenhouse gas emissions—a review, *Biomass Convers. Biorefinery.* 280 (2020). <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00604-5>.
- [126] S. Gupta, H.W. Kua, H.J. Koh, Application of biochar from food and wood waste as green admixture for cement mortar, *Sci. Total Environ.* 619–620 (2018) 419–435. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.044>.
- [127] H. Thers, S.N. Djomo, L. Elsgaard, M.T. Knudsen, Biochar potentially mitigates greenhouse gas emissions from cultivation of oilseed rape for biodiesel, *Sci. Total Environ.* 671 (2019) 180–188. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.257>.

- [128] Q.-W. Song, L.-N. He, Atom Economy, in: *Encycl. Sustain. Sci. Technol.*, Springer New York, New York, NY, 2018: pp. 1–21. [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2493-6\\_1001-1](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2493-6_1001-1).
- [129] J. Idris, Y. Shirai, Y. Anduo, A.A.M. Ali, M.R. Othman, I. Ibrahim, R. Husen, M.A. Hassan, Improved yield and higher heating value of biochar from oil palm biomass at low retention time under self-sustained carbonization, *J. Clean. Prod.* 104 (2015) 475–479. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.023>.
- [130] R.V. Quah, Y.H. Tan, N.M. Mubarak, J. Kansedo, M. Khalid, E.C. Abdullah, M.O. Abdullah, Magnetic biochar derived from waste palm kernel shell for biodiesel production via sulfonation, *Waste Manag.* 118 (2020) 626–636. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.016>.
- [131] M.N. Uddin, K. Techato, J. Taweekun, M.M. Rahman, M.G. Rasul, T.M.I. Mahlia, S.M. Ashrafur, An overview of recent developments in biomass pyrolysis technologies, *Energies.* 11 (2018). <https://doi.org/10.3390/en11113115>.
- [132] International Biochar Initiative, (n.d.). <https://biochar-international.org/> (accessed July 2, 2021).

**Centro de Investigación en Palma de Aceite, Cenipalma**

Calle 98 # 70-91. Piso 14

PBX: (57-1) 313 8600

[www.cenipalma.org](http://www.cenipalma.org)