

Nuevas estrategias de valorización de biomasa forestal en biochar: el “Oro negro de la Naturaleza”

Ángel Yedra Martínez^a, Carmen Manteca Martínez^a, María Magdalena Peña^a, Inmaculada Ortiz-Gómez^a, Josefa Fernández-Ferreras^b, Patricia Ortega Sañudo^b

^aCentro Tecnológico CTC, Parque Científico y Tecnológico de Cantabria (PCTCAN), 39011 Santander, España

^bDepartamento de Química e Ingeniería de Procesos y Recursos. Universidad de Cantabria. Avd. de los Castros s/n 39005 Santander, España

E-mail autor: ayedra@centrotecnologicoctc.com

RESUMEN

El planeta se enfrenta graves crisis ambientales, siendo el calentamiento global una de las más urgentes. Este fenómeno es causado por gases de efecto invernadero emitidos por actividades humanas. Ante esto, los recursos renovables surgen como alternativa sostenible para reducir emisiones. Destacan los bio-productos derivados de biomasa, como el biochar, con emisiones neutras de carbono. El biochar se obtiene por pirólisis y mejora la fertilidad del suelo mientras secuestra carbono. Se le conoce como el "Oro Negro de la Naturaleza" por su valor ecológico y múltiples usos. El trabajo se ha desarrollado dentro del proyecto FORTEXVAL, que promueve la bioeconomía circular con tecnologías sostenibles. Se ha utiliza biomasa agroforestal para producir biochar mediante procesos pirólisis. Esto permite la eliminación de masa forestal de bajo valor en el territorio, y por tanto, mitiga el riesgo de incendios. La producción de biochar aporta beneficios ambientales como la reducción de gases de efecto invernadero, el secuestro de carbono y la valorización de residuos.

La biomasa seleccionada fue pirolizada y previamente tratada (secado/cortada/peletizada). El rendimiento de obtención de biochar es mayor a temperaturas bajas pirólisis (300 °C). El biochar obtenido fue caracterizado química y físicamente, incluyendo espectroscopía FTIR, análisis de porosidad y superficie específica. La porosidad del biochar es fundamental en su uso agrícola como reservorio de agua y soporte de fertilizantes. En el proyecto se han desarrollado un sistema de liberación controlada de fertilizante usando el biochar como nano-transportador. Esta solución responde a las necesidades de la agricultura de precisión, reduciendo el impacto ambiental. El biochar también puede usarse en materiales compuestos, aplicaciones en baterías, supercondensadores, celdas de combustible y producción de hidrógeno. También puede actuar como adsorbente para tratamiento de aguas y captura de CO₂. En catálisis, es una alternativa sostenible a los catalizadores metálicos tradicionales. En conjunto, el biochar es una solución versátil, ecológica y con alto potencial en múltiples sectores industriales. FORTEXVAL cuenta con apoyo del MITECO y fondos europeos del plan NextGenerationEU.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el mundo se enfrenta a graves crisis ambientales que amenazan la Tierra. Entre estas crisis, el calentamiento global y su efecto en el cambio climático es uno de los desafíos ambientales más importantes que amenazan al planeta y a todos sus habitantes [1]. Está ampliamente reconocido que este fenómeno se origina por la acumulación de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, los cuales son liberados principalmente por actividades humanas, en particular, la combustión de combustibles fósiles. Debido al aumento de la temperatura media de la superficie terrestre, el calentamiento global provoca consecuencias desfavorables como el aumento del nivel del mar, tormentas e inundaciones, incendios, enfermedades infecciosas, entre otras. Por lo tanto, se puede afirmar que el calentamiento global puede tener efectos perjudiciales para la salud humana y la calidad de los ecosistemas.

Debido a la industrialización, el aumento de la población y la mejora en los niveles de vida resulta prácticamente imposible eliminar las actividades humanas. Según los científicos, actualmente, el único camino disponible es la producción y uso de productos basados en recursos renovables que puedan minimizar los efectos causados por las emisiones de carbono (C). De hecho, el consumo de recursos renovables, especialmente la biomasa, libera dióxido de carbono que es compensado por el carbono absorbido por la biomasa durante su crecimiento, por lo tanto, se considera "neutro en carbono". En consecuencia, la transición hacia productos con cero o bajas emisiones de carbono es crucial para mitigar los impactos negativos de las emisiones de carbono y abordar los desafíos que plantea el cambio climático [1].

En este sentido, los bio-productos son productos innovadores y ecológicos que pueden derivarse de recursos de biomasa, ofreciendo soluciones sostenibles en diversas industrias [2]. En comparación con los productos tradicionales que se basan principalmente en combustibles fósiles y, por lo tanto, desempeñan un papel clave en las emisiones de carbono, los bio-productos se basan en biomasa que cumple con emisiones netas de carbono cero.

Actualmente, existe una amplia gama de bio-productos como bioplásticos, bio-compuestos, biocombustibles, etc., que han alcanzado la fase de comercialización y han demostrado resultados exitosos. Entre los tipos de bio-productos, el biochar [3] es un producto rico en carbono que se obtiene al calentar materia orgánica en un ambiente con bajo contenido de oxígeno o en ausencia total de oxígeno, bajo un proceso llamado pirólisis [8]. Este bio-producto es conocido por sus diversas aplicaciones, siendo una de las más importantes su uso para mejorar la fertilidad del suelo y secuestrar carbono en prácticas agrícolas [4]. El biochar no solo se basa en biomasa, sino que también puede ser un relevante secuestrador de carbono.

La expresión "biochar", aunque aún no está oficialmente reconocida por la Real Academia Española (RAE), hace referencia a un producto similar al carbón vegetal, de textura fina y porosa, surgido recientemente. Además, es rico en carbono, inerte, de alta estabilidad, estructura porosa, alta superficie específica y dispone de grupos funcionales. Se obtiene a través de la pirólisis, un proceso de descomposición térmica de la biomasa con un suministro limitado de oxígeno o en ausencia total de este. Organizaciones internacionales como *The International Biochar Initiative* (IBI) [5], la red Biochar Europe [6] y expertos como Lehmann [7] lo definen como "biochar" cuando se destina a mejorar la calidad del suelo o al secuestro de carbono, excluyendo su uso como combustible. Esta designación resalta su origen orgánico y lo distingue del carbón vegetal tradicional empleado para la combustión. En la actualidad, al biochar se le conoce como "Oro Negro de la Naturaleza", debido a que se trata de un material de naturaleza renovable, sólido inerte de alto contenido de carbono y alta porosidad-superficie específica, con

múltiples aplicaciones potenciales de valor. Según Mohanty et al [3], el biochar es “un sólido carbonoso y poroso producido mediante un proceso de pirólisis que transforma la materia orgánica (BIO), el cual posee propiedades físico-químicas adecuadas para el almacenamiento seguro y a largo plazo de carbono en el medio ambiente y, potencialmente, para la mejora del suelo. Ampliar sus aplicaciones más allá del suelo y los combustibles hacia áreas avanzadas como los compuestos poliméricos, la energía y el medio ambiente es una estrategia clave para sustituir una amplia gama de materiales carbonosos convencionales de origen fósil, con los beneficios adicionales de la sostenibilidad y la circularidad”.

La presente publicación, presenta los avances alcanzados en el proyecto FORTEXVAL [9], el cual persigue el desarrollo de un nuevo modelo de bioeconomía circular de gestión forestal basado en la valorización de recursos agroforestales mediante la utilización de tecnologías de baja huella de carbono. Estas tecnologías van desde la recogida del material con técnicas de tracción animal que reducen el impacto ambiental durante la explotación forestal pasando por la peletización *in situ* de la biomasa, lo que reduce los requerimientos logísticos y facilita su manejo; hasta la obtención de nuevos productos de alto valor, como el biochar, a través del acondicionamiento y procesado del material de partida. El proyecto se ha desarrollado en la Mancomunidad Reserva del Saja (MRS) [10], en Cantabria (España). Para la obtención del biochar mediante la pirólisis, se ha empleado como materia prima biomasa forestal de la MRS.

El proyecto FORTEXVAL ha contado con el apoyo de la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.

2. EXPERIMENTAL

2.1 Materia prima

Las principales ventajas de utilizar la biomasa como materia prima para la obtención de biocarbón son su diversidad, abundancia, alto contenido en carbono y beneficios medioambientales (como el secuestro de carbono, la valorización de residuos, la reducción de gases de efecto invernadero, reducción de masa forestal de bajo valor). Además del contenido en carbono, el grado de humedad y la proporción de mineral de la biomasa, influyen en su calidad las relaciones oxígeno/carbono e hidrógeno/carbono junto con las cenizas residuales. La biomasa rica en lignina puede producir biocarbón con alto contenido en carbono y características gráficas dominantes.

Para el desarrollo experimental, se ha utilizado la biomasa forestal extraída de la MRS. Las biomásas que se han empleado y estudiado para la obtención del biochar mediante el proceso de pirólisis son, principalmente, de las siguientes especies:

- Tojo (*Ulex Europaeus*)
- Eucalipto (*Eucalytus Globulus*)
- Roble común (*Quercus Robur*)
- Haya (*Fagus Sylvatica*)

Se ha estudiado la composición química de las especies seleccionadas en el territorio de estudio, con el fin de seleccionar las más adecuadas para la obtención de biochar mediante la pirólisis. Los resultados se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición química de las especies seleccionadas.

Materia prima	Composición química (%)							
	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina	Extractos	Cenizas	Carbono fijo	Volátiles	Humedad
Tojo (<i>Ulex Europaeus</i>)	47,5	22,2	24,5	6,7	1,46	20,08	73,7	2,83
Eucalipto (<i>Eucalyptus Globulus</i>)	54	18,9	23,1	4,9	0,4	19	77,5	6,5
Roble Común (<i>Quercus Robur</i>)	49,81	21,43	25,97	1,7	0,25	12,99	79,87	8,18
Haya (<i>Fagus Sylvatica</i>)	49,1	22	23,8	0,8	0,5	18,5	77,3	10

Estas biomásas se han procesado mediante técnicas desarrolladas dentro del proyecto FORTEXVAL, como se muestra en la Figura 1. El proceso seguido consta de las siguientes etapas: trituración, secado, densificación y peletizado. Los pélets obtenidos están compuestos por una mezcla de ramas, corteza y hojas.



Figura 1. Proceso seguido para el tratamiento de biomasa forestal (en este caso Tojo- *Ulex Europaeus*) para su posterior uso en pirólisis para la obtención de biochar. De izquierda a derecha: especie Tojo (A), proceso de trituración *in situ* (B), máquina de secado y peletizado (C), pélets listos para ser usados en pirólisis (D).

Considerando la composición química, especialmente el contenido de lignina para la obtención de biochar, así como los procesos de tratamiento aplicados (triturado, densificado y peletizado) a las especies de biomasa seleccionadas, el tojo ha mostrado el mejor desempeño en dichas etapas.

2.2 Proceso de pirólisis

La tecnología de pirólisis es un proceso termoquímico mediante el cual, el material orgánico se degrada en una atmósfera en ausencia o escasez de oxígeno [8]. La materia prima mediante la acción del calor, a temperaturas entre 300 y 900 °C, es transformada en una mezcla de hidrocarburos, gases combustibles, residuos de carbón y agua. Las transformaciones físicas y químicas que ocurren durante la pirólisis son complejas y dependen de la naturaleza de la biomasa inicial y de las condiciones de pirólisis como la velocidad de calentamiento, temperatura, presión y tiempo de residencia, principalmente [11]. Del proceso de pirólisis se

obtienen tres productos: un sólido llamado **biochar**, un líquido llamado **bioaceite o bio-oil** y un gas también conocido como **bio-gas, syngas o gas de síntesis** (véase Figura 2).

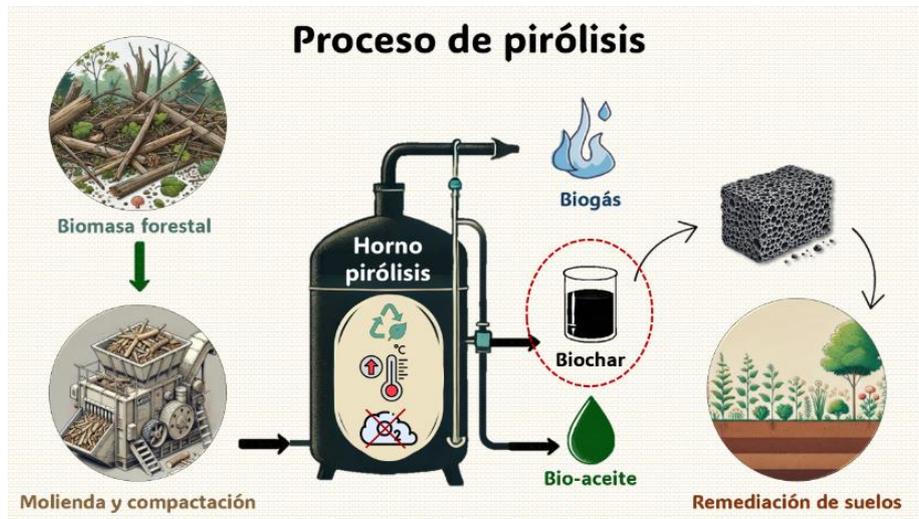


Figura 2. Esquema del proceso de obtención de biochar en el proyecto FORTEXVAL.

El biochar es un material inerte compuesto por materiales no combustibles, que no se transformaron o provienen de una condensación molecular con alto contenido de carbón. El bioaceite está formado por hidrocarburos de cadenas largas, alquitranes, aceites, fenoles y ceras que se han producido a través de reacciones de craqueo y condensación a altas temperaturas, distinguiendo dos fases principalmente, una oleosa y otra acuosa. El gas de síntesis se compone de una mezcla de gases, siendo los más importantes: CO, CO₂, H₂ y CH₄. Este gas es altamente combustible y se destina a la generación de energía (electricidad y calor). La proporción de estos productos depende del tipo de pirólisis que se realice, lenta, intermedia o rápida. Sus principales características se muestran en la Tabla 2 [12]:

Tabla 2. Tipos de pirólisis y principales características.

Tipo de pirólisis	Temperatura (°C)	Velocidad de calentamiento (°C/min)	Tiempo de residencia (s)	Rendimiento medio de los productos		
				Biochar (%)	Bio-oil (%)	Syngas
Lenta	300-800	0,1-2	Largo (1800-2400)	>35	>30	>40
Intermedia	300-500	300	Moderado (>5)	>25	>75	>20
Rápida	400-950	1000	Corto (0,03-1,5)	>25	>70	>16

Para producir char se puede utilizar como materia prima cualquier residuo que tenga materia orgánica (residuos agroforestales, residuos municipales, coproductos industriales, residuos plásticos...). Sin embargo, de acuerdo con [5], el biocarbón o biochar es un producto de carbonización de grano fino, caracterizado por un alto contenido de carbono orgánico y baja susceptibilidad a la degradación, que se obtiene a través de la pirólisis de biomasa y residuos biodegradables.

La selección de la biomasa es uno de los factores determinantes en los rendimientos de los productos. Dependiendo que producto se desee obtener habrá que seleccionar una biomasa u otra. En la Figura 3 se muestran los diferentes rendimientos en función de la biomasa procesada [13].



Figura 3. Rendimientos de los diferentes productos obtenidos en función de la biomasa pirolizada [13].

Además de la materia prima, existen otros parámetros influyentes en el proceso de pirólisis, los cuales son resumidos en la Figura 4 [14].

Materias primas	Procesos	Producto	Uso y aplicaciones
<ul style="list-style-type: none"> Cultivos energéticos de biomasa (maíz, cereales, pellets de madera, aceite de palma, colza) Residuos de bioenergía Residuos agrícolas (paja de trigo, cáscaras de avellana y maní, madera de desecho, etc.) Compost (residuos verdes) Estiércol / desechos animales (pollo) Residuos de cocina, plásticos, alimentos, etc. Lodos de depuradora 	<ul style="list-style-type: none"> Pirólisis rápida (anhídrida) Pirólisis lenta (baja temperatura, 450–550 °C, sin oxígeno, a veces con vapor) Pirólisis lenta (alta temperatura, 600–900 °C, sin oxígeno) Gasificación (alta temperatura, calentamiento rápido, presencia de oxígeno) Fermentación, digestión anaerobia y tratamiento bio-mecánico Carbonización ('marrón' a 300 °C, 'negra' a 380 °C) 	<ul style="list-style-type: none"> Gas de síntesis, bioaceite Sólido biochar Syngas Biochar activado Etano y metano combustibles Etanol, Metano y lodos Carbón vegetal 	<ul style="list-style-type: none"> Gas de síntesis, bioaceite, biochar sólido: Calor. Combustible (quemado para generar electricidad o convertido en gas de síntesis). Bioquímicos de alto valor utilizados como aditivos alimentarios o farmacéuticos. Acondicionadores de suelo / fertilizantes Biochar (pirólisis lenta, baja temperatura): Enmienda del suelo (pH neutro/alcalino, la porosidad retiene agua, la capacidad de intercambio catiónico mejora el crecimiento vegetal frente al biochar de alta temperatura). Combustible (cocina y calefacción). Biochar activado: Porosidad extrema y gran área superficial. Filtración de agua y adsorción de contaminantes (gas, líquidos o sólidos). Biochar (de gasificación): Combustible (bajo rendimiento, alta reactividad). Contaminación de algunas materias primas (p. ej., metales y plásticos en residuos de cocina) puede impedir el uso de lodos/biochar en el suelo. Metano y lodo: Combustible (para electricidad o cocina). Subproductos (madera, alquitrán de madera). Sustituto del coque derivado del carbón en la fundición de metales.

Figura 4. Esquema de parámetros influyentes en los procesos de pirólisis [14].

La instalación pirólisis donde se han realizado los ensayos es la que se muestra en la Figura 5. La misma se encuentra ubicada en los laboratorios del CTC.

Se trata de un horno tubular vertical, cuya temperatura máxima es de 1.100 °C. Dispone de dos sistemas de refrigeración formados por trampas para recogida de bio-oil y condensación de volátiles condensables, y enfriador de las tapas del reactor. Además, dispone de un caudalímetro y la bombona con gas N₂ a la entrada del sistema de pirólisis para introducir la cantidad adecuada de gas inerte (empleado para conseguir que el proceso de pirólisis se realice en atmósfera inerte, ya que se trata de una degradación térmica en ausencia de O₂ gas).

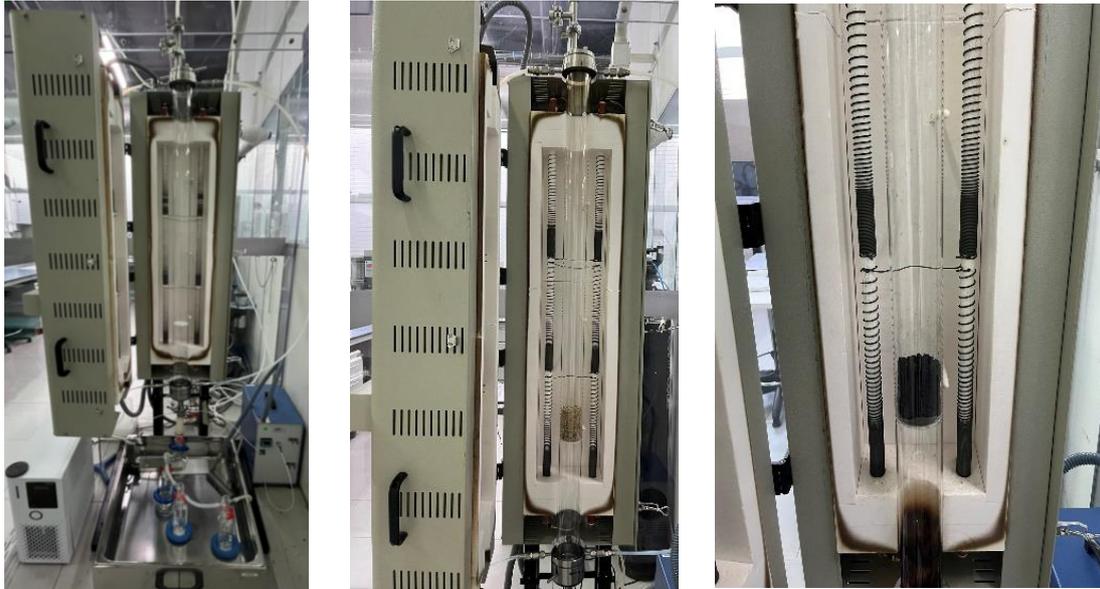


Figura 5. Sistema de pirólisis ubicado en los laboratorios del CTC.

El resumen de las condiciones experimentales empleadas para el estudio en los procesos de pirólisis fueron las siguientes (Tabla 3):

Tabla 3. Parámetros experimentales empleados en la pirólisis.

Temperatura (°C)	300	400	500
Velocidad de calentamiento (°C/min)	5	5	5
Tiempo de residencia (h)	1	1	1
Caudal gas N ₂ (l/min)	2	2	2

3. RESULTADOS

Se ha realizado un estudio experimental detallado de pirólisis sobre la especie seleccionada: Tojo (*Ulex Europaeus*). El estudio ha consistido, inicialmente, en una caracterización química inicial de la biomasa. Posteriormente se han realizado experimentos de pirólisis a diferentes temperaturas para evaluar los rendimientos del proceso y finalmente se ha caracterizado el biochar obtenido.

3.1. Caracterización química mediante espectroscopía FTIR de las biomásas empleadas

Todas las biomásas tienen espectros muy similares, estos solo cambian en las intensidades con las que aparecen algunas bandas.

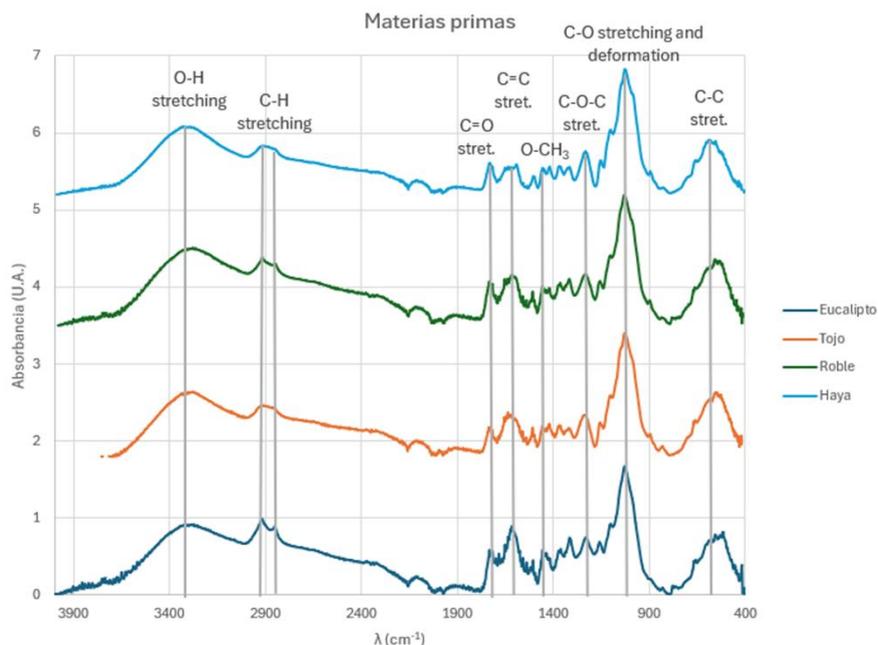


Figura 6. Espectros FTIR de las diferentes biomásas empleadas en el estudio.

La banda más significativa en los espectros (Figura 6) es la ubicada en $1088-890\text{ cm}^{-1}$. Se trata de la banda que presenta la mayor absorbancia IR. Está vinculada a los grupos funcionales C-O *stretching* y C-O *deformation*, puede deberse a la presencia de etanol (C-OH). Las altas intensidades de las bandas en los espectros entre 1670 cm^{-1} y 1530 cm^{-1} pueden deberse al modo esquelético aromático que se intensifica por la presencia de sustitutos polares que contienen oxígeno.

En la Figura 7, se muestran los rendimientos obtenidos para los diferentes procesos de pirólisis a diferentes temperaturas.

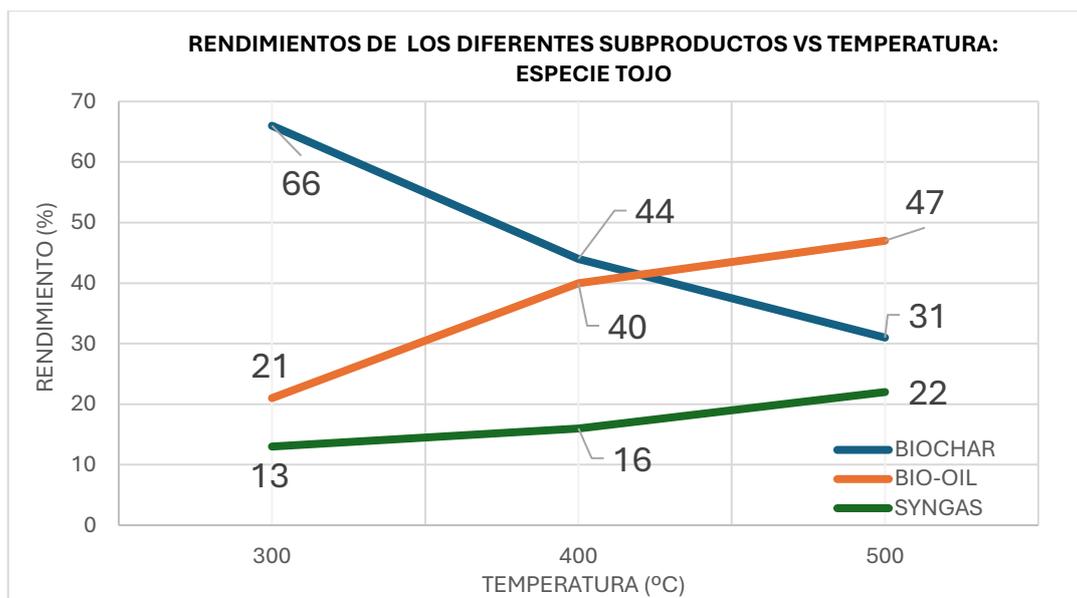


Figura 7. Estudio comparativo del rendimiento de los diferentes subproductos frente a distintas temperaturas de proceso de pirólisis para la especie de Tojo.

Se observa claramente que el rendimiento para la obtención de biochar es superior cuando se realiza la pirólisis a temperaturas más bajas (300 °C). De este estudio, además, se puede concluir, que para la producción de la fase líquida (*bio-oil*) el rendimiento del proceso es superior a altas temperaturas (500 °C).

3.2. Caracterización físico-química del biochar obtenido

El biochar producido (Figura 8) ha sido caracterizado físico-químicamente.

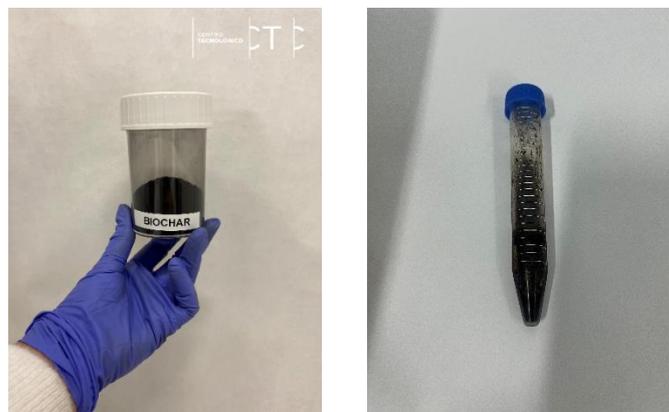


Figura 8. Ejemplo de muestra de biochar obtenida tras la pirólisis (izquierda). También se muestra ejemplo de *bio-oil* obtenido (derecha).

Un parámetro importante para muchas de las aplicaciones potenciales del biochar es su grado de porosidad interna. Por ejemplo, en agricultura como reservorio de agua en suelos. Este grado de porosidad interna viene caracterizado con la magnitud de superficie específica. En ese caso, una mayor porosidad (superficie específica) permitirá tener al biochar mayor capacidad de almacenaje de agua. Para ello se han realizado medidas de isoterma de adsorción BET, mostrándose los resultados en la Tabla 4.

Tabla 4. Datos de porosidad de los biochar obtenidos de Tojo para las diferentes pirólisis.

Producto	Temperature de pirólisis (°C)	Gas usado en isoterma de adsorción	Superficie específica (m ² /g)	Tipo de porosidad
Biochar	300	CO ₂	96,13	Microporoso
	400	CO ₂	287,48	Microporoso
	500	CO ₂	194,43	Microporoso

En general, todas las muestras disponen de alta superficie específica, aunque destacan el biochar obtenido a mayores temperaturas de pirólisis (400°C).

Se ha realizado una caracterización química de los biochar obtenidos mediante espectroscopía FTIR. Los espectros se muestran en la Figura 9.

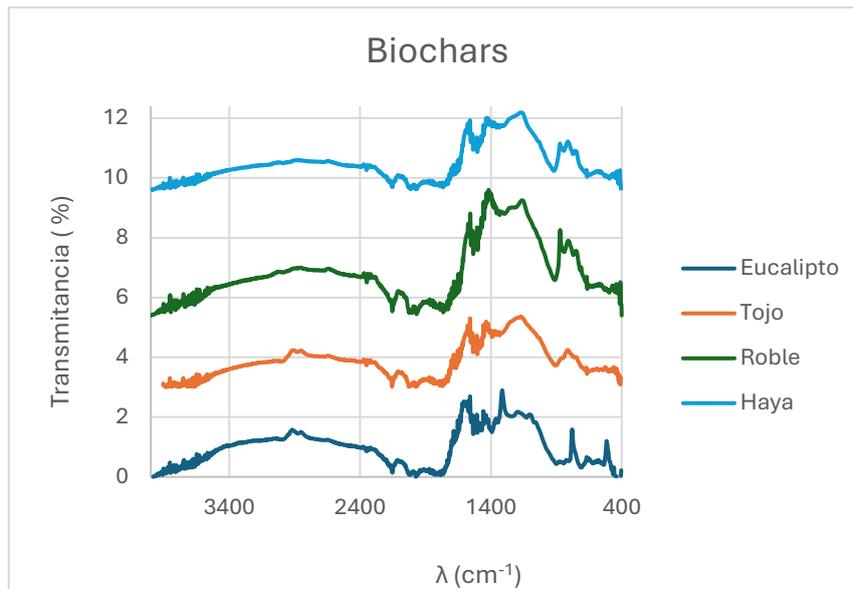


Figura 9. Espectros FTIR de biochar obtenidos a partir de diferentes especies de biomasa.

Los espectros de biochar procedente de diferentes biomasa presentan una forma e intensidad similares, siendo fruto del proceso de pirólisis. Sin embargo, existen diferencias importantes con los espectros debido a la presencia de distintos grupos funcionales en la superficie, como grupos oxigenados (C=O, C-O, -OH) y otros grupos (olefinas, -CH₂, -CH₃, y anillos aromáticos). La disminución en la intensidad de la absorción de los grupos OH (3600-3000 cm⁻¹) puede explicarse por la pérdida de agua de la biomasa, lo cual estaría asociado con una liberación importante de agua debida a la degradación de polisacáridos. Por otro lado, la reducción en la intensidad de la banda asociada a los grupos alqueno (C-H) (3000-2770 cm⁻¹) puede interpretarse como el resultado de la ruptura de enlaces débiles entre el C y H en los grupos alquilo, lo que a su vez incrementa la cantidad de hidrocarburos, como CH₄ y C₂, en los productos gaseosos (eliminación de grupos C metoxílicos). La intensidad de la banda correspondiente a los grupos carbonilo (1785-1670 cm⁻¹) también disminuyó, lo que parece vinculado a la degradación de los componentes de celulosa durante la transformación de biomasa en biochar. Además, las intensidades de las bandas en el rango 1670-1530 cm⁻¹, que representan deformaciones aromáticas C=C, son notablemente mayores en los carbones en comparación con las materias primas, sugiriendo un proceso de craqueo de volátiles y la transformación de compuestos alifáticos en aromáticos en el carbón (proceso de pirólisis). Esta conversión se asocia con una disminución marcada en los picos de alquilo OH y CH. Finalmente, en los biochar obtenidos se observa un pico alrededor de 800 cm⁻¹, que podría deberse a vibraciones de CH aromático, lo cual probablemente indica la formación de estructuras policondensadas en sistemas de anillos fusionados.

4. POTENCIALES APLICACIONES DE BIOCHAR

El biochar puede jugar un papel importante en la agricultura, ya que puede mejorar la fertilidad del suelo, reduciendo la necesidad de fertilizantes y mitigando las emisiones de óxidos de nitrógeno, además de constituir una herramienta útil para la gestión de residuos orgánicos (Figura 10). Además, tiene el potencial de reducir las emisiones de CO₂, actuando como sumidero de C. Su producción puede conllevar el aprovechamiento energético de los bio-aceites y gases originados durante el proceso de pirólisis, reduciendo así la utilización de combustibles fósiles [7]. Su aplicación en suelos es, a fecha actual, el uso que ya está en el mercado.

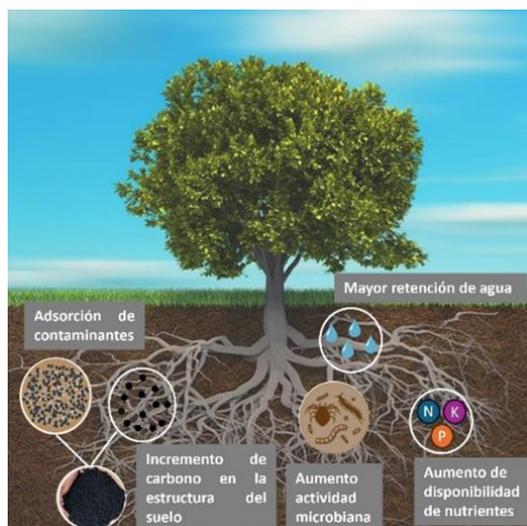


Figura 10. Beneficios de usar el biochar en suelos.

En este sentido, CTC está desarrollando sistemas de liberación lenta y controlada de fertilizantes, usando el biochar obtenido como nano-transportador del fertilizante. Este tipo de soluciones son demandadas en la actualidad en la agricultura (*agricultura de precisión*) para conseguir una dosificación eficiente de fertilizantes en el cultivo que minimice el impacto ambiental en el suelo y optimice el desarrollo de la planta. Para ello se ha implementado un método de infusión del fertilizante en la estructura microporosa del biochar mediante un proceso de mezcla en agitación (Figura 11).

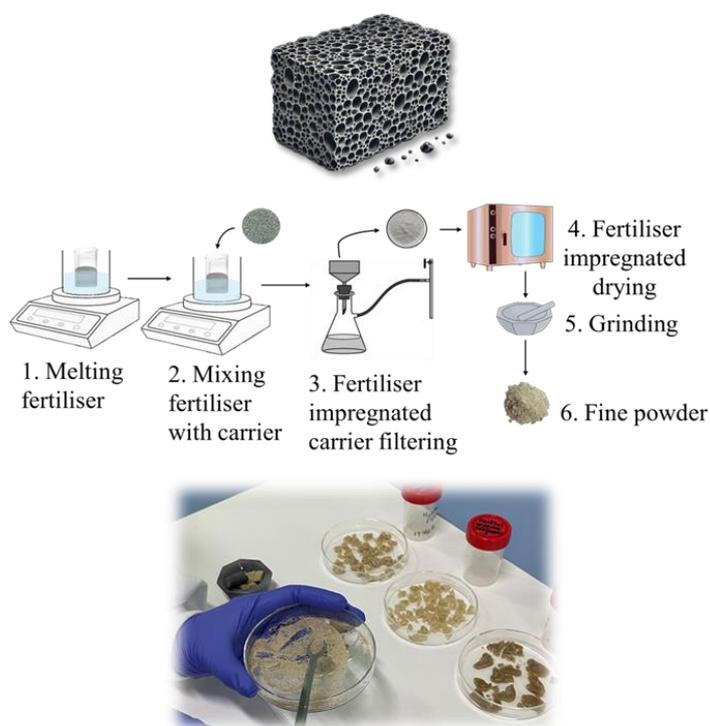


Figura 11. Esquema simplificado de proceso infusión del fertilizante en la estructura microporosa de biochar, y muestras desarrolladas.

Posteriormente, el sistema fue encapsulado con reactivos químicos (*Hydrophobic Deep Eutectic Solvents-HDES*) para conseguir una liberación del fertilizante lenta y controlada cuando el

sistema entra en contacto con el agua. El sistema completo ha sido evaluado mediante su introducción en agua y realización de medidas de liberación del fertilizante en función del tiempo, usando medidas de conductividad eléctrica de electrolitos (Figura 12).

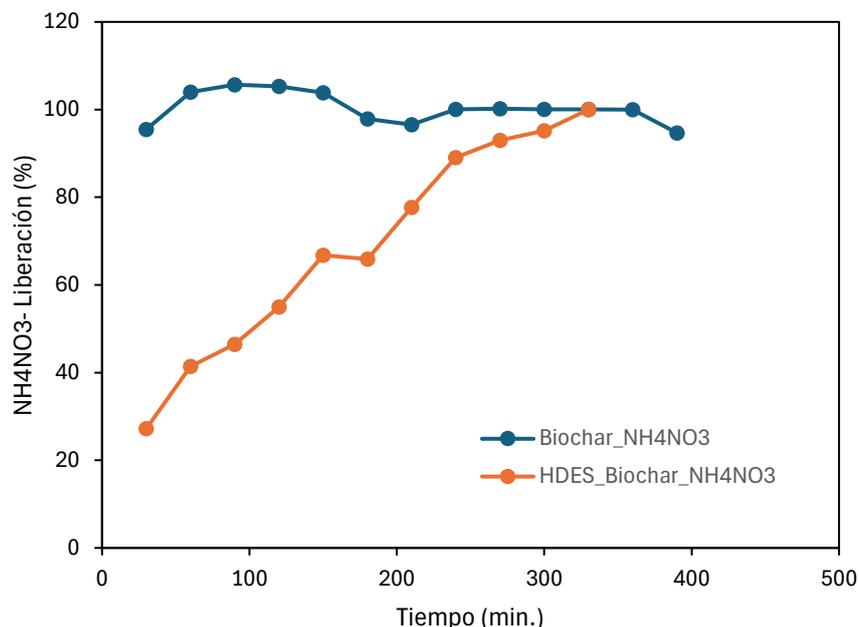


Figura 12. Curvas comparativas de liberación de fertilizante (NH₄NO₃) integrado en biochar en función del tiempo, para sistema completo desarrollado (color naranja) y sistema sin encapsular (color azul).

Se observa la capacidad del sistema completo desarrollado de realizar una liberación del fertilizante lenta y progresiva si se compara con el sistema sin encapsular.

Por otro lado, existen numerosos trabajos científicos donde se describen diferentes potenciales aplicaciones del biochar, destacando:

- **Materiales compuestos poliméricos:** uso de biochar como sustituto de refuerzo mecánico o fibra corta convencional. Reduce impacto ambiental. Algunos estudios muestran mejoras mecánicas en materiales compuestos de polipropileno.
- **Baterías:** los biocarbones debido a su estructura 3D porosa y alta superficie específica ofrecen una alternativa para su uso como electrodos de batería, minimizando resistencias al transporte de iones.
- **Supercapacitores:** Biocarbon con alta conductividad eléctrica exhibe prestaciones capacitivas.
- **Conversión de energía (Figura 13):** Los biocarbones conductores se han empleado como materiales alternativos a los convencionales en las celdas de combustible. también pueden ser materiales alternativos para el desarrollo de nuevas generaciones de placas fotovoltaicas (capa delgada orgánica), ya que en la actualidad existen las limitaciones de alto coste de fabricación y el uso de elementos críticos (tierras raras). Debido a su microestructura porosa, los biocarbones, son candidatos para incrementar la eficiencia en la producción de H₂ verde.

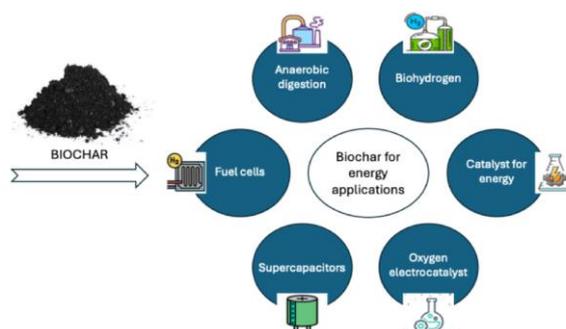


Figura 13. Aplicaciones de biochar en energía [15].

- **Recuperación ambiental:** los biocarbones permiten un tratamiento eficiente de aguas residuales favoreciendo la eliminación de contaminantes como tintes, metales y materia orgánica, entre otros. También presentan un alto potencial en aplicaciones de captura y almacenaje de CO₂ gas (CCS).
- **Almacenaje de energía:** los biocarbones tienen estructura porosa, alta superficie específica y conductividad eléctrica, características esenciales para la eficiencia en el almacenaje y conversión de energía.
- **Almacenaje de H₂:** los biocarbones tienen estructura porosa, alta superficie específica y grupos funcionales, facilitando el almacenaje de hidrógeno a temperatura ambiente.
- **Sensores:** los biocarbones, previamente modificados, pueden ser empleados como materiales sensores eficientes, debido a su capacidad de transferencia de electrones.
- **Catálisis:** los biocarbones ofrecen una alternativa sostenible a los catalizadores convencionales metálicos y óxidos metálicos. Además, tienen una mayor estabilidad en el tiempo.
- **Hormigones:** uso de biocarbón como sustituto sostenible para el cemento, mejorando algunas propiedades como absorbente de agua, propiedades mecánicas, secuestro de carbono.

5. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado biochar a partir de biomasa agroforestal mediante un proceso de pirólisis. El estudio ha permitido determinar los parámetros óptimos, como la temperatura (300°C) del proceso para aumentar su rendimiento. Además, se ha caracterizado química y físicamente el biochar obtenido mediante técnicas como espectroscopía FTIR e isothermas de adsorción BET. Los resultados de porosidad del biochar permiten su aplicación en agricultura, como reservorio de agua en suelos o como sistema de liberación controlada de fertilizantes. En esto último, se han desarrollado y validado con éxito un sistema de liberación lenta y controlada de fertilizantes basado en biochar. Finalmente, el biochar tiene un amplio rango de aplicaciones potenciales, desde el ámbito de la energía hasta procesos de remediación ambiental.

6. REFERENCIAS

- [1] Maryam Afshar a, Saeed Mofatteh. Biochar for a sustainable future: Environmentally friendly production and diverse applications Results in Engineering 23 (2024) 102433.
- [2] F. Qureshi, M. Yusuf, H. Kamyab, D.-V.N. Vo, S. Chelliapan, S.-W. Joo, Y. Vasseghian, Latest eco-friendly avenues on hydrogen production towards a circular bioeconomy: Currents challenges, innovative insights, and future perspectives, Renew. Sustain. Energy Rev. 168 (2022) 112916.
- [3] Amar K. Mohanty, Singaravelu Vivekanandhan, Oisik Das, Lina M. Romero Millán, Naomi B. Klinghoffer, Ange Nzihou, Manjusri Misra. Biocarbon materials. Nature Reviews Methods Primers (2024) 4:19.
- [4] Abdul Waheed, Hailiang Xu, Xu Qiao, Aishajiang Aili, Yeernazhaer Yiremaikebayi, Dou Haitao, Murad Muhammad. Biochar in sustainable agriculture and Climate Mitigation: Mechanisms, challenges, and applications in the circular bioeconomy. Biomass and Bioenergy 193 (2025) 107531.
- [5] <https://biochar-international.org/>.
- [6] <https://www.biochareurope.eu/>.
- [7] Lehmann, J., Joseph, S. 2009. "Biochar for environmental management: An introduction". Chapter 1. Biochar: Environmental Management Science and Technology. Ed. J. Lehmann, S. Joseph. Earthscan (London).
- [8] CUETO GARCÍA, María Jesús. Potencial de producción de biochar en España a partir de residuos de la industria papelera, de lodos de EDAR, de residuos sólidos urbanos y de residuos ganaderos: Estudio de la fijación de carbono. 2016. Tesis Doctoral. Agrónomos.
- [9] <https://fortexval.es/>.
- [10] <https://mancomunidadreservadelsaja.es/>.
- [11] Palomo González, L.F. Valorización de productos de la conversión termoquímica de biomasa lignocelulósica residual: biochar como aditivo agrícola. Tesis para obtener el Grado de Maestro en Ciencias en Bioprocesos. Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 2020.
- [12] N. Afanasjeva et al., J. Sci. Technol. Appl., 5 (2018) 4 – 22 <https://doi.org/10.34294/j.jsta.18.5.31>.
- [13] Anil Kumar Varma, Ravi Shankar, and Prasenjit Mondal. A Review on Pyrolysis of Biomass and the Impacts of Operating Conditions on Product Yield, Quality, and Upgradation. https://doi.org/10.1007/978-981-13-1307-3_10.
- [14] Sohi, S.Loez-Capel, E, Krull, E., Bol, R., Biochar's roles in soil and climate change: A review of research needs. CSIRO Land and Water Science Report 05/09, 64 pp.. (2009).
- [15] Sivaraman Chandrasekaran et al. Biochar-based materials for sustainable energy applications: A comprehensive review. Journal of Environmental Chemical Engineering 12 (2024) 114553.

AGRADECIMIENTOS Y FINANCIACIÓN

Los autores quieren agradecer las colaboraciones realizadas por los miembros del consorcio del proyecto FORTEXVAL: La Mancomunidad Reserva del Saja y el Centro Tecnológico de Automoción de Galicia (CTAG). FORTEXVAL cuenta con el apoyo de la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.