



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Producción de biochar a partir de residuos: pirólisis asistida por
microondas y carbonización hidrotermal*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNA: María Justicia Ais

DIRECTORAS: Rocío Maceiras Castro
Leticia Pérez Rial

CURSO ACADÉMICO: 2024-2025

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Producción de biochar a partir de residuos: pirólisis asistida por
microondas y carbonización hidrotermal*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

Este trabajo aborda la problemática ambiental derivada de la generación de residuos orgánicos y su potencial valorización mediante la producción de biochar. Para ello, se han empleado dos técnicas: pirólisis asistida por microondas y carbonización hidrotermal con autoclave, aplicadas a residuos como cáscaras de naranja, piel de plátano, posos de café y piel de patata.

La pirólisis asistida por microondas se llevó a cabo aplicando diferentes potencias (450 W, 600 W y 800 W), mientras que la carbonización hidrotermal se realizó con distintos tiempos de reacción (2 y 4 horas), para analizar la influencia en el biochar obtenido. Además, los resultados fueron comparados con el método de HTC convencional para determinar el método más efectivo para la producción de biochar.

Asimismo, se ha realizado un estudio estadístico mediante ANOVA para evaluar la influencia de la potencia y el tiempo en las propiedades del biochar obtenido.

Los biochar obtenidos fueron caracterizados para identificar los usos más adecuados en función de sus propiedades. Los resultados indican que la pirólisis a 800 W genera el mayor rendimiento y poder calorífico, mientras que la carbonización hidrotermal a 4 horas favorece una mayor retención de carbono. Finalmente, el residuo que presentó los mejores resultados tanto en rendimiento como en contenido de carbono fijo fueron los posos de café.

PALABRAS CLAVE

Biochar, Residuo, Valorización, Pirólisis asistida por microondas, Carbonización hidrotermal

AGRADECIMIENTOS

A mis tutoras Dña. Rocío Maceiras y Dña. Leticia Pérez Rial, por el apoyo, tiempo y confianza que han depositado en mí para la realización de este Trabajo de Fin de Grado.

A mis padres y hermana, por su apoyo incondicional durante estos cinco años y por creer en mí incluso cuando yo misma dudaba. Por su orgullo al verme crecer, por motivarme a alcanzar todo lo que me propongo y por su cariño, comprensión y paciencia en cada etapa de este camino.

A mis compañeros de promoción, quienes se han convertido en mi segunda familia y, sin duda, lo más valioso que me llevo de estos cinco años. En especial, a mis compañeras del estudio 222, por compartir conmigo largas noches de estudio y brindarme su apoyo y comprensión en los momentos más difíciles.

A mis amigos de toda la vida, quienes, a pesar de la distancia, han mantenido intacta nuestra amistad. Por su apoyo incondicional en cualquier circunstancia, por sus consejos y por demostrarme siempre su cariño. Sobre todo, por celebrar mis logros con el mismo orgullo y alegría como si fueran propio.

A mi pareja, por ser mi apoyo incondicional y pilar fundamental durante estos cinco años. Su paciencia, comprensión y confianza en mí han sido esenciales en cada etapa de este camino. Me ha acompañado en mi crecimiento, no solo académico, sino también personal y militar, motivándome a dar siempre lo mejor de mí.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	4
Índice de Tablas.....	6
Índice de ecuaciones.....	8
1 Introducción y objetivos	9
1.1 Introducción	9
1.2 Objetivos	9
2 Estado del arte	11
2.1 Residuos	11
2.1.1 Clasificación de residuos	11
2.2 Generación de residuos	15
2.2.1 Factores que influyen en la generación de residuos	15
2.2.2 Gestión de residuos.....	17
2.3 Biocarbón (biochar)	19
2.3.1 Propiedades.....	19
2.3.2 Aplicaciones del biochar.....	19
2.4 Métodos de producción del biochar	21
2.4.1 Pirólisis	22
2.4.2 Torrefacción.....	22
2.4.3 Gasificación	22
2.4.4 Carbonización hidrotermal (HTC).....	23
2.5 Pirólisis asistida por microondas.....	24
2.6 Carbonización hidrotermal (HTC)	24
3 Desarrollo del TFG.....	27
3.1 Residuos empleados	28
3.2 Preparación de las muestras	29
3.3 Ensayos de caracterización	29
3.3.1 Granulometría	29
3.3.2 Densidad	29
3.3.3 Análisis inmediato	30
3.3.4 Análisis elemental del biochar.....	30
3.3.5 Poder calorífico.....	31
3.4 Ensayos de pirólisis asistida por microondas.....	31

3.5 Ensayos de carbonización hidrotermal	34
3.6 Caracterización del biochar.....	38
3.6.1 Densidad y porosidad	38
3.6.2 Rendimiento del biochar.....	38
3.6.3 pH	39
3.6.4 Análisis estadístico ANOVA.....	39
4 Resultados y discusión	41
4.1 Datos obtenidos.....	43
4.1.1 Densidad	43
4.1.2 Humedad inicial residuos	44
4.1.3 pH	44
4.1.4 Porosidad	46
4.1.5 Rendimiento.....	47
4.1.6 Análisis inmediato	48
4.1.7 Análisis elemental y poder calorífico	50
4.1.1 Eficiencia energética.....	54
4.2 Análisis estadísticos de varianza.....	55
4.2.1 Densidad	56
4.2.1 Porosidad	57
4.2.2 Rendimiento.....	59
4.2.3 Carbono fijo	60
4.2.4 Poder calorífico.....	62
4.3 Comparativa de métodos.....	63
4.3.1 Cáscara de naranja	63
4.3.2 Piel de plátano.....	66
4.3.3 Posos de café.....	69
4.3.4 Piel de patata.....	72
4.3.5 Comparativa con estudios previos	74
4.4 Aplicaciones del biochar obtenido	76
4.4.1 Adsorción.....	76
4.4.2 Mejora de suelos	76
4.4.3 Tratamiento de aguas	77
4.4.4 Procesos de combustión.....	77
5 Conclusiones	79
5.1 Conclusiones	79
5.2 Líneas futuras	80

6 Bibliografía.....	81
Anexo I: Implicaciones Sociales, Económicas, Ambientales	86
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Clasificación de los residuos [3].....	12
Figura 2-2 Residuos sanitarios [8].....	13
Figura 2-3 Residuos peligrosos [9]	14
Figura 2-4 Proyección RSM [12]	16
Figura 2-5 Generación de residuos en el año 2022 en UE [13].....	16
Figura 2-6 Generación de residuos.....	18
Figura 2-7: Economía circular.....	21
Figura 2-8 Gasificación	23
Figura 2-9 Proceso HTC.....	23
Figura 3-1 Metodología seguida en la pirólisis asistida por microondas	27
Figura 3-2 Metodología seguida en la carbonización hidrotermal con autoclave.....	28
Figura 3-3 Residuos estudiados.....	28
Figura 3-4 Secado de muestras.....	29
Figura 3-5 Mufla	30
Figura 3-6 Microondas	31
Figura 3-7 Cáscara de naranja	32
Figura 3-8 Posos de café	32
Figura 3-9 Cáscara de plátano	32
Figura 3-10 Piel de patata.....	33
Figura 3-11 Autoclave	34
Figura 3-12 Cáscara de naranja antes y después de la carbonización hidrotermal	35
Figura 3-13 Cáscara de plátano antes y después de la carbonización hidrotermal	35
Figura 3-14 Posos de café antes y después de la carbonización hidrotermal	35
Figura 3-15 Piel de patata antes y después de la carbonización hidrotermal	36
Figura 3-16 Cáscara de naranja antes y después de la estufa	36
Figura 3-17 Cáscara de plátano antes y después de la estufa	36
Figura 3-18 Posos de café antes y después de la estufa	37
Figura 3-19 Piel de patata antes y después de la estufa.....	37
Figura 3-20 Medición de pH	39
Figura 3-21 Análisis ANOVA.....	40
Figura 4-1 Diagrama de Van Krevelen [55].....	53
Figura 4-2 Diagrama de Van Krevelen: pirólisis asistida por microondas	53
Figura 4-3 Van Krevelen: HTC con autoclave.....	54
Figura 4-4 Rendimiento: cáscara de naranja	64

Figura 4-5 Carbono fijo: cáscara de naranja.....	64
Figura 4-6 Poder calorífico: cáscara de naranja	65
Figura 4-7 Cenizas: cáscara de naranja	66
Figura 4-8 Rendimiento: piel de plátano	66
Figura 4-9 Carbono fijo: piel de plátano	67
Figura 4-10 Poder calorífico: piel de plátano	68
Figura 4-11 Cenizas: piel de plátano	68
Figura 4-12 Rendimiento: posos de café	69
Figura 4-13 Carbono fijo: posos de café	70
Figura 4-14 Poder calorífico: posos de café	70
Figura 4-15 Cenizas: posos de café	71
Figura 4-16 Rendimiento: piel de patata	72
Figura 4-17 Carbono fijo: piel de patata	72
Figura 4-18 Poder calorífico: piel de patata	73
Figura 4-19 Cenizas: piel de patata	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Contraste de aspectos generales en las técnicas de obtención	22
Tabla 2-2 Comparativa de métodos entre los distintos residuos	25
Tabla 3-1 Ensayos: pirólisis asistida por microondas	33
Tabla 3-2 Ensayos: HTC con autoclave	37
Tabla 4-1 Ensayos: pirólisis asistida por microonda.....	41
Tabla 4-2 Ensayos HTC con autoclave	42
Tabla 4-3 Densidad del residuo y del biochar obtenido por pirólisis.....	43
Tabla 4-4 Densidad del biochar obtenido por HTC en autoclave	43
Tabla 4-5: Humedad inicial de los residuos para HTC	44
Tabla 4-6 pH del biochar: pirólisis asistida por microondas	44
Tabla 4-7 pH del biochar: HTC.....	45
Tabla 4-8 Porosidad del biochar: pirólisis asistida por microondas.....	46
Tabla 4-9 Porosidad del biochar: HTC.....	46
Tabla 4-10 Rendimiento: pirólisis asistida por microondas	47
Tabla 4-11 Rendimiento: HTC.....	48
Tabla 4-12 Análisis inmediato de los residuos.....	48
Tabla 4-13 Análisis inmediato del biochar: pirólisis asistida por microondas.....	49
Tabla 4-14 Análisis inmediato del biochar: HTC	50
Tabla 4-15 Análisis elemental y PCS: residuos originales.....	51
Tabla 4-16 Análisis elemental y PCS: pirólisis asistida por microondas.....	51
Tabla 4-17 Análisis elemental: HTC con autoclave.....	52
Tabla 4-18 Eficiencias: pirólisis y HTC.....	55
Tabla 4-19 Densidad: pirólisis asistida por microondas (g/mL)	56
Tabla 4-20 ANOVA densidad: pirólisis asistida por microondas	56
Tabla 4-21 Densidad: HTC (g/mL)	56
Tabla 4-22 ANOVA densidad: HTC.....	57
Tabla 4-23 Porosidad: pirólisis asistida por microondas (%).....	57
Tabla 4-24 ANOVA porosidad: pirólisis asistida por microondas	57
Tabla 4-25 Porosidad obtenida mediante HTC (%)	58
Tabla 4-26 ANOVA porosidad: HTC	58
Tabla 4-27 Rendimiento: pirólisis asistida por microondas (%).....	59
Tabla 4-28 ANOVA rendimiento: pirólisis asistida por microondas	59
Tabla 4-29 Rendimiento: HTC (%).....	59
Tabla 4-30 ANOVA rendimiento: HTC.....	60
Tabla 4-31 Carbono fijo: pirólisis asistida por microondas (%)	60

Tabla 4-32 ANOVA carbono fijo: pirólisis asistida por microondas	60
Tabla 4-33 Carbono fijo obtenido mediante HTC (%).....	61
Tabla 4-34 ANOVA carbono fijo: HTC.....	61
Tabla 4-35 Poder calorífico: pirólisis asistida por microondas (kcal/kg)	62
Tabla 4-36 ANOVA poder calorífico: pirólisis asistida por microondas	62
Tabla 4-37 Poder calorífico: HTC (kcal/kg)	62
Tabla 4-38 ANOVA poder calorífico: HTC.....	63

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 3-130

Ecuación 3-231

Ecuación 3-338

Ecuación 3-438

Ecuación 3-538

Ecuación 3-638

Ecuación 3-738

Ecuación 3-838

Ecuación 3-938

Ecuación 3-1039

Ecuación 4-155

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

En la actualidad, el manejo de residuos constituye uno de los retos medioambientales más significativos a escala mundial. El incremento en la generación de residuos, motivado por el crecimiento poblacional y los patrones de consumo de una sociedad industrializada, ha generado un escenario alarmante donde los recursos naturales se utilizan a un ritmo insostenible, mientras que los desechos, en muchas ocasiones se acumulan sin una valoración apropiada. Dentro de los distintos tipos de desechos, los residuos orgánicos tienen un papel importante, simbolizando una oportunidad para transformar materiales descartados en recursos valiosos, con un efecto directo en la reducción del cambio climático y la preservación del medio ambiente.

En este contexto, es responsabilidad de las instituciones establecer medidas ambientales rigurosas que ayuden a reducir el efecto de los residuos y fomenten prácticas de sostenibilidad. La Escuela Naval Militar, dedicada a cumplir con las regulaciones medioambientales, ha elaborado tácticas para manejar los desechos producidos en sus instalaciones, asegurando un tratamiento apropiado y fomentando la valorización de estos. En un contexto con elevados índices de desecho de materiales, tales como alimentos, residuos orgánicos y otros residuos relacionados con las actividades cotidianas, es decisivo investigar soluciones que conviertan los desechos en recursos útiles.

Entre las alternativas más prometedoras se encuentra el biochar, un material obtenido a partir de la conversión de biomasa mediante procesos termoquímicos. Su producción permite aprovechar los residuos orgánicos y darles un nuevo valor, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental. Existen diferentes métodos de obtención de biochar, cada uno con características específicas y aplicaciones diversas.

Ante el desafío que representa la gestión de residuos y la necesidad de encontrar soluciones sostenibles, la producción de biochar se perfila como una estrategia clave dentro de la valorización de materiales orgánicos. Su potencial para reducir el impacto ambiental, favorecer la economía circular y optimizar el aprovechamiento de recursos convierte a este material en un elemento de gran interés dentro del ámbito científico y tecnológico.

1.2 Objetivos

El objeto de este trabajo es analizar la producción de biochar a partir de residuos orgánicos generados en la Escuela Naval Militar mediante dos técnicas: pirólisis asistida por microondas (MW) y carbonización hidrotermal con autoclave. Se ha estudiado la influencia de la potencia de microondas y

el tiempo de reacción en cada método, con el objetivo principal de determinar cuál de los dos procedimientos permite obtener biochar con mejores propiedades y mayor eficiencia en su producción.

Como objetivos secundarios se han planteado los siguientes:

- -Caracterización de los biochar obtenidos por las diferentes técnicas (análisis elemental, inmediato, poder calorífico, pH, porosidad, densidad, rendimiento) con el fin de identificar aquellas aplicaciones más adecuadas en función de sus características.
- -Realización de un análisis estadístico mediante ANOVA para determinar qué factores (tipo de residuo, potencia aplicada o tiempo del proceso) tienen mayor impacto en las propiedades del biochar producido.
- -Comparación de ambos métodos, pirólisis asistida por MW y carbonización hidrotermal (HTC) con el objetivo de identificar qué técnica puede resultar más eficiente en la producción de biocarbón.

En base a los resultados obtenidos en este trabajo, se busca no solo comparar los métodos de producción de biochar citados, sino también proponer soluciones para optimizar su producción.

2 ESTADO DEL ARTE

En este primer apartado del trabajo se tratará el problema de los residuos, desde su categorización, producción y manejo, hasta su conversión en recursos valiosos a través de tecnologías sustentables. Se centrará en el biochar, un material revolucionario con características sobresalientes, tales como incrementar la fertilidad del suelo, retener contaminantes y capturar carbono, lo que lo hace un instrumento fundamental para la sostenibilidad del medio ambiente. Por último, se examinarán los procedimientos de obtención de biochar, poniendo especial énfasis en procesos como la pirólisis asistida por microondas, resaltando su eficacia y pertinencia en el marco de la economía circular y la mitigación del cambio climático. Este enfoque integral tiene como objetivo vincular soluciones tecnológicas con la administración responsable de los desechos dando lugar a alternativas que permitan la construcción de un futuro más sustentable.

2.1 Residuos

En primer lugar, se definirá el término residuo de dos formas distintas para comprender de manera más efectiva el concepto. La principal definición es: “La palabra residuo (con origen en el latín *residuum*) describe al material que pierde utilidad tras haber cumplido con su misión o servido para realizar un determinado trabajo. El concepto se emplea como sinónimo de basura por hacer referencia a los desechos que el hombre ha producido” [1]. La segunda definición viene dada por la Ley 22/2011: “cualquier sustancia u objeto que su poseedor deseché o tenga la intención o la obligación de desechar” [2].

Hay que tener en cuenta que a pesar de que se relacionan los conceptos de basura y residuo, no tienen el mismo significado. Un residuo puede volver a ser aprovechado a diferencia de la basura que no tiene ningún provecho tras ser descartada.

2.1.1 Clasificación de residuos

Los residuos se pueden clasificar en función de su origen, peligrosidad o composición, tal y como se muestra en la Figura 2-1.

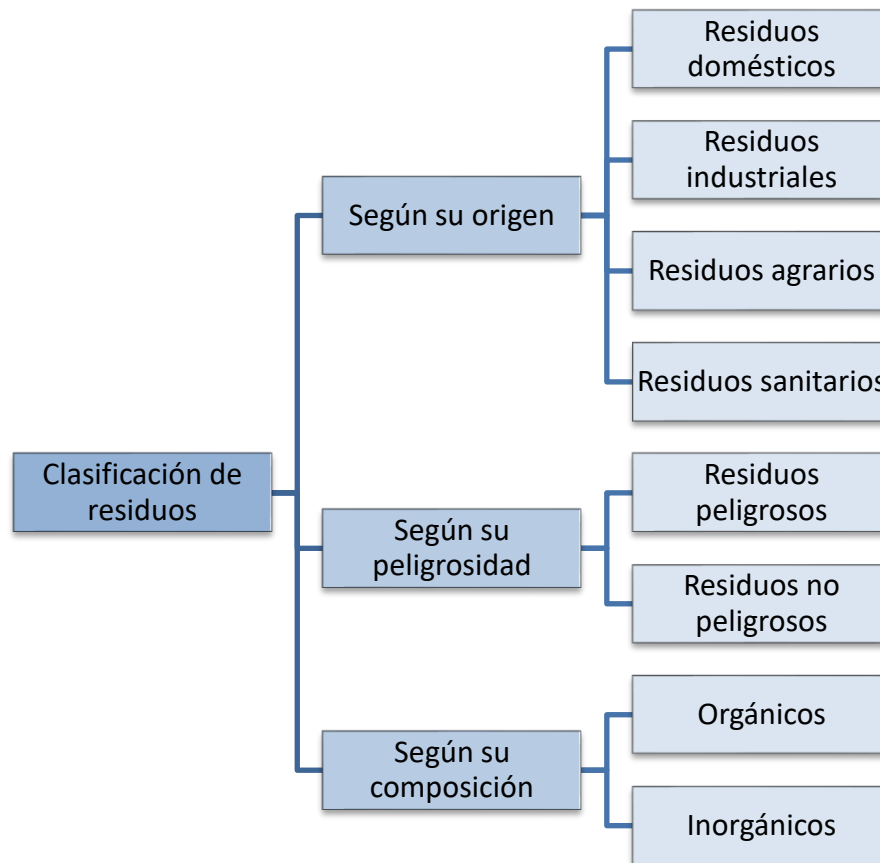


Figura 2-1 Clasificación de los residuos [3]

2.1.1.1 Según su origen

En función de su origen los residuos se pueden clasificar en [4]:

- **Residuos domésticos**
Son aquellos producidos por tareas diarias en un hogar, así como actividades de limpiezas en zonas verdes, recreativas o vías públicas.
- **Residuos industriales**
Se refieren a los productos derivados de un proceso de producción, mantenimiento, consumo o limpieza generados en una industria. Estos desechos no pueden ser utilizados ya que o no hay tecnologías tan desarrolladas como para darle otro uso, o bien porque supondría un elevado costo. Estos residuos pueden ser clasificados en tres grupos:
 - *Residuos inertes*: aquellos que no son reconocidos como un peligro para la salud ni medioambiente, por lo que no requieren tratamiento en su etapa final.
 - *Residuos urbanos*: se asemejan a los desechos sólidos urbanos. Son los generados en lugares públicos, viviendas, restaurantes, oficinas y comercios. El grueso principal se compone de desechos no peligrosos como plásticos, papel, cartón metales y residuos orgánicos. Estos materiales son reciclables empleando equipos específicos para cada tipo de sólido.
 - *Peligrosos o especiales*: requieren un cuidado particular dado que representan un riesgo tanto para la salud humana como para el entorno.
- **Residuos agrarios**
Los desechos derivados de actividades agrícolas y ganaderas, junto con los derivados de la transformación de dichas explotaciones, forman parte de este grupo. Se excluyen de este grupo los residuos forestales, los derivados de la acuicultura y los subproductos de origen animal no aptos para el consumo [5].

- **Residuos sanitarios**

Se refiere a los desechos producidos en centros de salud, hospitales y clínicas. En comparación con otros residuos, estos contienen materiales radioactivos, químicos y biológicos por lo que su gestión debe ser la adecuada para evitar riesgos [6] [7].

Los residuos sanitarios se clasifican en cuatro grandes grupos (Figura 2-2):

- *Residuos sanitarios asimilables a residuos municipales o de tipo I:* para su administración no se establecen requisitos específicos. Incluyen cartón, papel, cocinas, bares, comedores, talleres, jardinería y desechos provenientes de pacientes no contagiosos, excepto aquellos que no pertenecen a los grupos II y III.
- *Residuos sanitarios no específicos o de tipo II:* Es necesario implementar acciones preventivas tanto en la recolección como en el almacenaje, manejo y traslado, pero únicamente dentro del centro de salud.
- *Residuos sanitarios específicos o de riesgo o tipo III:* con estos desechos, las acciones deben implementarse tanto en el interior como en el exterior del centro sanitario, ya que pueden representar un riesgo para la salud pública y laboral. A su vez estos residuos se pueden clasificar en:
 - Residuos sanitarios o infecciosos.
 - Residuos anatómicos humanos.
 - Sangre y hemoderivados en forma líquida.
 - Agujas y material punzante.
 - Vacunas vivas y atenuadas.
- *Residuos tipificados en normativas singulares o de tipo IV:* la administración de este tipo de residuos debe estar ligada a exigencias especiales en términos de higiene y medio ambiente. Estos residuos comprenden:
 - Residuos citostáticos: son desechos con compuestos químicos que pueden provocar daño celular y, además, tienen la capacidad de frenar la progresión de la neoplasia.
 - Restos de sustancias químicas: materiales que contienen sustancias químicas.
 - Medicamentos caducados, aceites minerales y sintéticos, residuos con metales.
 - Residuos radioactivos: materiales infectados con compuestos radioactivos.
 - Residuos anatómicos humanos: restos humanos resultantes de intervenciones quirúrgicas y cadáveres.



Figura 2-2 Residuos sanitarios [8]

2.1.1.2 Según su peligrosidad

En función de su peligrosidad, los residuos se clasifican en peligrosos y no peligrosos [8] :

- **Residuos peligrosos**

Estos residuos poseen propiedades que pueden representar un riesgo tanto para la salud de las personas como para el medio ambiente. Dependiendo de su composición y características, pueden clasificarse en tóxicos, inflamables, corrosivos, reactivos o incluso radiactivos. Además, pueden presentarse en tres estados: sólido, líquido y gas.

Según la Ley 7/2022, se consideran residuos aquellos que presentan una o más de las cualidades de riesgo establecidas en su anexo I, así como los que han sido identificados como tales por la legislación de la Unión Europea. Dentro de esta categoría también se incluyen los envases contaminados con sustancias peligrosas o que contengan restos de estas [9].

Algunos ejemplos de residuos peligrosos son (véase Figura 2-3):

- Metales pesados
- Baterías usadas
- Petróleo o gas natural
- Algunos residuos que emiten radiación como el uranio o plutonio
- Pinturas y disolventes
- Equipos electrónicos desechados, como frigoríficos, aires acondicionados, móviles, pantallas y televisores con tecnología distinta de LED.



Figura 2-3 Residuos peligrosos [9]

- **Residuos no peligrosos**

Un desecho no peligroso es aquel que no represente un peligro tanto para las personas como para el entorno natural. Estos materiales pueden ser removidos mediante procedimientos tradicionales, considerando que no necesitan medidas especiales debido a su seguridad al manipularlos.

2.1.1.3 Según su composición

En función de su composición los residuos pueden clasificarse en [10]:

- **Orgánicos**
Aquellos materiales que proceden de elementos vegetales, animales o comestibles se denominan residuos orgánicos. Estos se pueden volver a aprovechar a través de un proceso de desintegración que permite obtener una segunda vida. Una mala gestión puede provocar riesgos sanitarios severos.
- **Inorgánicos**
Este tipo de residuo no puede ser aprovechado tras su uso e incluso puede llegar a no descomponerse, se denomina residuo no biodegradable.

La clasificación de los residuos permite establecer criterios adecuados para su tratamiento y disposición, diferenciando entre aquellos que requieren una gestión especial debido a su peligrosidad y aquellos que pueden ser reciclados o reutilizados. Sin embargo, más allá de su clasificación, es fundamental comprender la dinámica de su generación, ya que el volumen y tipo de residuos producidos dependen directamente de factores como el crecimiento poblacional, los hábitos de consumo y los procesos industriales.

El aumento en la generación de residuos representa un desafío ambiental y logístico que requiere estrategias eficientes para su reducción, valorización y correcta eliminación. A continuación, se analiza el contexto de la generación de residuos, abordando las principales fuentes de producción y su impacto en la sostenibilidad y gestión de recursos.

2.2 Generación de residuos

La generación de residuos es una consecuencia de las acciones humanas, sucediendo tanto en el ámbito individual como industrial. Hace referencia al proceso donde los materiales pierden su utilidad en su estado actual o deseado y son posteriormente eliminados. Diversos factores determinan la cantidad y tipo de residuos generados en cada sector, influyendo en su evolución a lo largo del tiempo. Estos aspectos se analizan en el siguiente apartado [11].

La cantidad y tipo de residuos han evolucionado con el tiempo debido a cambios en los patrones de consumo, la industrialización y el crecimiento demográfico. Según el Banco Mundial, en 2016 se generaban 2,01 mil millones de toneladas de residuos sólidos urbanos al año, cifra que podría aumentar en un 70 % para 2050 si no se implementan medidas de mitigación [12].

2.2.1 Factores que influyen en la generación de residuos

La generación de residuos no es un proceso homogéneo, sino que está condicionado por diversos factores que determinan la cantidad y tipo de desechos producidos en cada región o sector. Entre los principales factores que influyen en la generación de residuos se encuentran los siguientes [13]:

- Crecimiento poblacional: un aumento de la población provoca a su vez un aumento de cantidad de residuos generados, destacando las áreas urbanas con una elevada densidad demográfica.
- Modelo económico: influye en la cantidad de residuos generados. Las economías basadas en el consumo masivo y los productos de un solo uso tienden a producir grandes volúmenes de desechos, mientras que enfoques como la economía circular buscan minimizar la generación mediante la reutilización y el reciclaje de materiales.
- Hábitos de consumo: una demanda excesiva de productos electrónicos y un uso excesivo de envases de un solo uso, provocan también una notable generación de desechos.

- Industrialización y urbanización: el desarrollo industrial y la expansión de las ciudades contribuye al incremento de producción de residuos de construcción, electrónicos y peligrosos.

La interacción de estos factores ha generado un incremento constante en la producción de residuos a nivel mundial. En la Figura 2-4 muestra la proyección de generación de residuos sólidos municipales hasta el año 2050, evidenciando un aumento significativo del 70 % si no se implementan estrategias de mitigación y reducción [14].

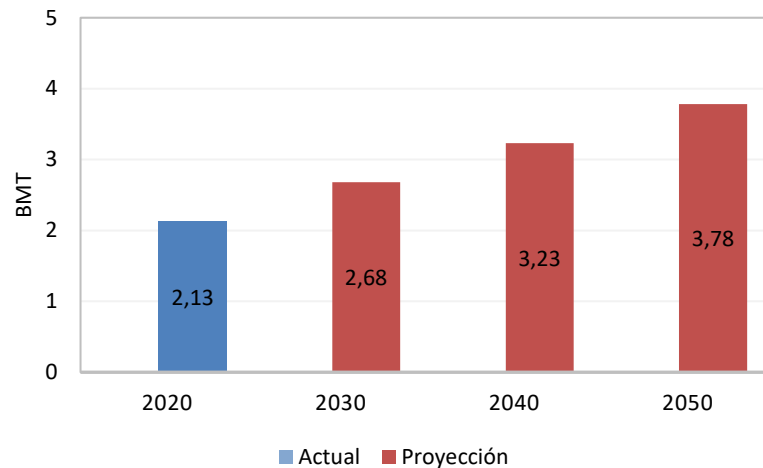


Figura 2-4 Proyección RSM [12]

Como se observa en la Figura 2-4, la generación de residuos sólidos municipales muestra una tendencia de crecimiento acelerado, con un aumento proyectado del 70 % para 2050. Este incremento evidencia la necesidad de adoptar estrategias sostenibles que permitan mitigar el impacto ambiental de los residuos, evitando que el problema continúe agravándose en las próximas décadas.

Además del crecimiento general en la generación de residuos sólidos municipales, es importante analizar qué sectores contribuyen en mayor medida a esta problemática. Las actividades económicas y los hogares generan distintos tipos y volúmenes de residuos, dependiendo de su nivel de producción y consumo de materiales. En la Figura 2-5 se muestra la distribución de los residuos generados por sector en la Unión Europea durante el año 2022, permitiendo identificar las actividades con mayor impacto en la producción total de desechos [15].

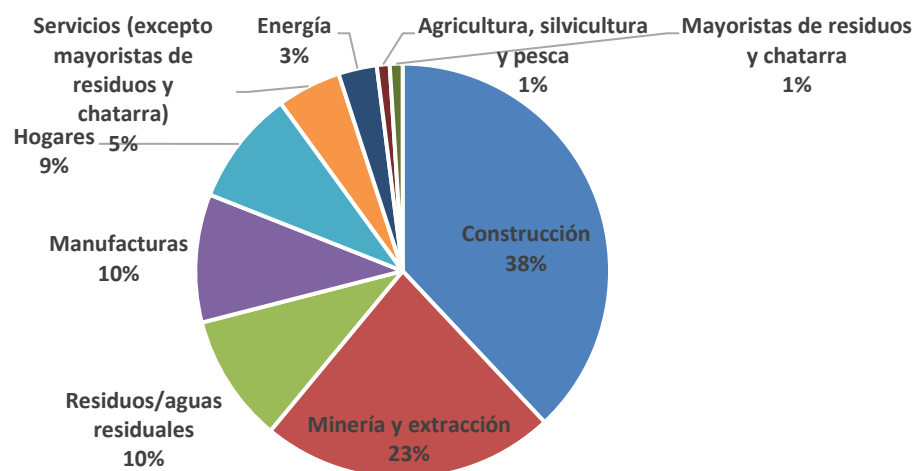


Figura 2-5 Generación de residuos en el año 2022 en UE [13].

Se observa que el sector de la construcción es el principal generador de residuos, representando el 38 % del total, seguido por la minería y extracción con un 23 %. Estos dos sectores combinados constituyen más de la mitad de los residuos generados, lo que resalta la necesidad de estrategias eficaces de reducción y reutilización en estas industrias. Otros sectores, como manufacturas (10 %), residuos/aguas residuales (10 %) y los hogares (9 %), también contribuyen de manera significativa a la generación de desechos, evidenciando la influencia tanto de las actividades industriales como domésticas en esta problemática.

La generación de residuos en distintos sectores productivos tiene repercusiones significativas en el medio ambiente, la salud pública y la economía. Su acumulación descontrolada puede derivar en la contaminación del suelo, el agua y el aire, además de favorecer la propagación de enfermedades. Por ello, resulta esencial implementar estrategias que permitan minimizar su impacto y promover soluciones sostenibles para su tratamiento y valorización.

2.2.2 Gestión de residuos

La correcta gestión de residuos asegura la salvaguarda y la sostenibilidad del entorno natural. Mediante una adecuada administración, es posible llevar a cabo y supervisar varias actividades vinculadas con la generación, recolección, transporte, tratamiento y disposición final de los residuos. Este objetivo favorece la preservación de los recursos naturales y promueve la economía circular.

2.2.2.1 Normativas y regulaciones sobre gestión de residuos

La gestión de residuos está regulada por un marco legal que busca minimizar su impacto ambiental y garantizar un tratamiento adecuado de los desechos. A nivel internacional, la Unión Europea ha desarrollado normativas que establecen principios clave para la reducción, reutilización y valorización de residuos, promoviendo un modelo de economía circular. En España, la legislación nacional adapta estas directrices al contexto local, estableciendo medidas específicas para la recogida, tratamiento y disposición final de los residuos. Estas normativas establecen las bases para una correcta gestión de residuos, definiendo criterios para su tratamiento y disposición. A partir de ellas, se pueden identificar diferentes modalidades de manejo de residuos en función de sus características y composición [16].

- **Normativa Europea**

- *Directiva Marco de Residuos (2008/98/CE)*: Establece el marco jurídico para el tratamiento de residuos en la Unión Europea, introduciendo la jerarquía de residuos que prioriza la prevención, reutilización, reciclaje, valorización y, como última opción, la eliminación. También refuerza el principio de "quien contamina paga" y la responsabilidad ampliada del productor [16].
- *Directiva (UE) 2018/851*: Modifica la Directiva 2008/98/CE, enfatizando la transición hacia una economía circular. Establece objetivos más ambiciosos de reciclaje y valorización, y refuerza los requisitos para la responsabilidad ampliada del producto [16].

- **Normativa en España**

- *Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular*: Esta ley actualiza y reemplaza a la anterior Ley 22/2011. Su objetivo es minimizar los efectos negativos de la generación y gestión de residuos en la salud humana y el medio ambiente, alineándose con los principios de la economía circular. Introduce medidas como la obligatoriedad de la recogida separada de ciertas fracciones de residuos y refuerza la responsabilidad ampliada del productor [16].

2.2.2.2 Modalidades de manejo de residuos

Hay cinco modalidades de manejo de residuos donde los materiales pueden ser clasificados según sus propiedades:

- Gestión de residuos sólidos: desechos provenientes de viviendas, compañías o sectores industriales. Los procedimientos pueden incluir el compostaje o el reciclaje.
- Gestión de residuos líquidos: son aguas residuales de origen industrial o doméstico. Los métodos de tratamiento pueden incluir la depuración, desinfección o rehuso para el riego de cultivos.
- Gestión de residuos peligrosos: aquellos que contienen sustancias tóxicas, inflamables, explosivas o corrosivas.
- Gestión de residuos orgánicos: su procedencia es biológica y pueden ser sobras de alimentos, desechos agrícolas, papel y cartón, entre otros.
- Gestión de residuos electrónicos: residuos generados por ordenadores, electrodomésticos, teléfonos móviles o dispositivos electrónicos.

2.2.2.3 Etapas del proceso de gestión de residuos

Para poder aplicar una correcta gestión de residuos, los desechos que se desean tratar deben pasar por una serie de etapas tal y como se muestra en la Figura 2-6 [17]:

1. Generación de residuos: hace referencia a la generación de desechos. El propósito principal es sensibilizar sobre la necesidad de disminuir esta gran generación de desechos que existe actualmente para minimizar los efectos en el medio ambiente.
2. Recolección: se refiere a la eficacia con la que se recolectan los desechos generados considerando la seguridad de estos, por lo que se debe considerar la categorización de los materiales de acuerdo con el tipo de residuo y sus propiedades.
3. Transporte: consiste en trasladar los residuos a las instalaciones pertinentes para su tratamiento o eliminación.
4. Tratamiento: Estos residuos son sometidos a diversos procedimientos dependiendo del tipo y las propiedades de este, con el fin de poder o bien modificarlo para su posterior tratamiento o bien proceder a su eliminación. El propósito principal es maximizar el uso de estos materiales.
5. Eliminación: Se produce cuando no es factible someter los desechos a un tratamiento para su reutilización, por lo que es necesario verificar que las instalaciones y los vertedores donde se transportan cumplen con las condiciones.



Figura 2-6 Generación de residuos

2.3 Biocarbón (biochar)

El biochar es un material fino y poroso rico en carbono (C). Se obtiene mediante un procedimiento conocido como pirólisis, en el que el material es sometido a una degradación térmica de los materiales orgánicos a causa de la ausencia de oxígeno y temperaturas inferiores a 700 °C [18].

Para identificar las propiedades del biochar, es esencial centrarse en la materia prima empleada y en su proceso de producción. Sin embargo, las características más destacables del biochar son su elevado contenido en C, su reducido contenido en nitrógeno y su baja densidad. Esto pone de manifiesto que es un material altamente poroso y con características adsorbentes. Finalmente, es importante señalar que su degradación es bastante lenta.

2.3.1 *Propiedades*

El biochar es un material sólido obtenido de biomasa que facilita el almacenamiento de carbono en el terreno, potenciando su fertilidad, estructura y habilidad para retener agua, de esta manera se reduce la necesidad de utilizar fertilizantes y favorece a la actividad microbiana. Incrementa la capacidad para intercambiar cationes y retener nutrientes, incrementa el pH y funciona como agente de enladrado, además de eliminar contaminantes como pesticidas y metales pesados [18].

También es importante resaltar que el biochar permite mantener rendimientos de cosecha parecidos con dosis de fertilización inferiores a las ideales, desempeñando su función más como un estructurador de terrenos que como un abono. Su implementación tiene como objetivo balancear las cosechas en lugar de incrementar la producción. Además, optimiza el proceso de compostaje, es un componente del compost fermentado y ayuda a capturar el carbono en el terreno, disminuyendo las emisiones de CO₂, óxido nítrico y metano, lo que lo transforma en un aliado frente al cambio climático [19].

Aparte de su uso en terrenos, el biochar se distingue por alta capacidad de adsorción de gases, gracias a su superficie porosa y amplia zona específica. Estas propiedades le permiten funcionar como un adsorbente efectivo para compuestos orgánicos volátiles (COVs), gases de efecto invernadero y otros contaminantes atmosféricos mejorando la calidad del aire y aportando a procesos industriales más ecológicos. Su capacidad para retener gases tóxicos lo convierte en un recurso útil para el control de las emisiones industriales y para la reducción de olores en actividades de agricultura y ganadería [19].

Pese a que su implementación ofrece considerables ventajas, su efecto fluctúa en función de las circunstancias locales y aún subsiste cierto escepticismo respecto a su comportamiento a largo plazo.

En general, el biochar representa un recurso con gran potencial para la administración sostenible del suelo y la reducción del cambio climático, siempre que se analice meticulosamente su aplicación en cada situación.

Las propiedades del biochar determinan su funcionalidad en distintos sectores, desde la mejora de suelos agrícolas hasta su uso en la descontaminación y gestión de residuos. A continuación, se presentan sus principales aplicaciones y beneficios en distintos ámbitos.

2.3.2 *Aplicaciones del biochar*

Debido a sus propiedades fisicoquímicas y su impacto ambiental positivo, el biochar se ha convertido en un material de gran interés en múltiples sectores. Su versatilidad permite su aplicación en la agricultura, la descontaminación ambiental y la economía circular. En los siguientes apartados se analizan sus usos más destacados y los beneficios que aporta en cada contexto.

2.3.2.1 *Optimización de suelos agrícolas*

La incorporación de biochar contribuye significativamente a la mejora de la calidad y fertilidad de los suelos agrícolas. Este material, abundante en carbono orgánico total (TOC), funciona como un almacenamiento de carbono, contribuyendo a la estabilización del terreno y a la reducción de las

emisiones de gases de efecto invernadero. Su estructura porosa optimiza la conservación de agua y nutrientes, lo que resulta particularmente ventajoso en zonas susceptibles a la sequía o con terrenos de escasa capacidad para almacenar agua. Además, el biochar tiene la capacidad de modificar el pH en terrenos ácidos, lo que impulsa la actividad biológica y garantiza la presencia de nutrientes vitales [19].

Otro de sus principales beneficios es su habilidad para aumentar la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del terreno, lo que permite el almacenamiento y la liberación progresiva de nutrientes como los nitratos, fosfatos y potasio. Esto, sumado a su habilidad para disminuir la lixiviación, incrementa notablemente la eficiencia de los fertilizantes, fomentando una utilización más eficaz de los mismos y disminuyendo la necesidad de sustancias químicas. Igualmente, el biochar promueve un incremento en la variedad de microorganismos beneficiosos en el terreno, aportando a un ecosistema agrícola más sano [18].

Cuando se mezcla con compost, el biochar potencia su efecto beneficioso al fortalecer la estructura del terreno, potenciar la actividad de los microorganismos y maximizar la utilización de fertilizantes. Finalmente, su habilidad para inmovilizar contaminantes orgánicos e inorgánicos lo hace una herramienta útil para la rehabilitación de terrenos degradados o contaminados, fomentando una agricultura más sustentable y resistente ante los desafíos del cambio climático [18].

2.3.2.2 Aplicaciones ambientales

El biochar desempeña un papel crucial en la gestión de terrenos contaminados, ya que retiene metales pesados y sustancias químicas mediante procesos de absorción y precipitación. Además, contribuye a la regulación de las condiciones redox del suelo, optimizando su estructura física y química para favorecer procesos de descontaminación [20]. Sus características porosas crean entornos ideales para el desarrollo de microorganismos, promoviendo un incremento en la biodiversidad que es esencial para la salud y sostenibilidad del ecosistema del terreno [21]. Adicionalmente, el biochar contribuye a reducir el desplazamiento de contaminantes hacia los acuíferos subterráneos, funcionando como un obstáculo natural. Asimismo, promueve la estabilización de carbono orgánico en el terreno, potenciando su habilidad para resistir efectos adversos en el medio ambiente y promoviendo su resistencia a largo plazo [19].

2.3.2.3 Economía circular y gestión de residuos

Aprovechar los residuos de manera eficiente es esencial para reducir su impacto ambiental y una solución efectiva es convertirlos en biochar. Este enfoque permite la utilización de desechos agrícolas, ganaderos, forestales y urbanos, disminuyendo su volumen y contribuyendo a la sostenibilidad. Además, su producción fomenta las economías locales al reutilizar residuos cercanos al sitio de generación y aplicación, promoviendo una gestión más responsable de los recursos disponibles [22].

Desde el punto de vista de la economía circular, el biochar funciona como un producto de valor añadido que concluye el ciclo de desechos, convirtiéndolos en un recurso valioso para terrenos agrícolas, materiales de edificación o filtros para el tratamiento del agua. Esta transformación transforma los residuos en recursos de gran valor, en concordancia con los principios de sostenibilidad y eficacia de recursos. De igual manera, el uso de biochar para la valorización de desechos genera nuevas posibilidades económicas para comunidades rurales y urbanas, creando empleos en procesos de recolección, fabricación y reparto (Figura 2-7) [22].



Figura 2-7: Economía circular

2.3.2.4 Filtración de agua

La mejora en la gestión ambiental puede lograrse mediante el uso de materiales como el biochar, que actúa como un filtro eficaz al eliminar metales pesados y residuos químicos de las aguas residuales. Además, su aplicación potencial en chimeneas de producción industrial permite reducir las emisiones de contaminantes, contribuyendo a una industria más sostenible y responsable con el medio ambiente [23].

El biochar se obtiene mediante distintos procesos termoquímicos, cuya elección influye en sus propiedades finales. Entre los métodos más empleados se encuentran la pirólisis, la carbonización hidrotermal, la torrefacción y la gasificación [24]. En el siguiente apartado se detallan estos procesos y se justifica la selección del método utilizado en este trabajo de fin de grado.

2.4 Métodos de producción del biochar

El biochar emerge como una alternativa sustentable para mitigar el cambio climático, incrementar la calidad del suelo y valorizar los desechos orgánicos. Su obtención puede realizarse a través de diferentes procesos termoquímicos, los cuales se clasifican en métodos de obtención en seco y en húmedo, dependiendo de las condiciones operativas y del estado de la biomasa utilizada [24].

Dentro de los métodos de obtención en seco, destacan la pirólisis convencional, la torrefacción y la gasificación, los cuales requieren biomasa con bajo contenido de humedad y operan a temperaturas elevadas en ausencia de oxígeno. Estos procesos favorecen la producción de un biochar con alta estabilidad química y propiedades mejoradas para su posterior aplicación [24].

Por otro lado, dentro de los métodos de obtención en húmedo, la carbonización hidrotermal (HTC) es la técnica más representativa. Este proceso permite transformar biomasa con alta humedad en un producto intermedio denominado hidrochar. Su principal ventaja es que no requiere un pretratamiento de secado, reduciendo de esta manera el consumo energético del proceso [25].

A continuación en la Tabla 2-1, se presenta un resumen con las propiedades más habituales para la producción de biochar [26].

Método	Temperatura (°C)	Tiempo (h)	Rendimiento del biochar (%)	Producción de biocombustible	Producción de syngas
Pirólisis convencional	400-700	1-2h	25-40	Moderada	Alta
Torrefacción	200-300	0.5-3	30-50	Baja	Muy baja
Gasificación	700-1000	0.5-2	oct-20	Baja	Muy alta
Carbonización hidrotermal (HTC)	180-250	5-2h	40-60	Baja	Baja

Tabla 2-1: Contraste de aspectos generales en las técnicas de obtención

2.4.1 Pirólisis

Este procedimiento es un proceso termoquímico donde los materiales orgánicos se degradan sin presencia de oxígeno, empleando temperaturas que varían entre 300 y 1000 °C para lograr la descomposición de los enlaces químicos [27]. Tres clases de productos son producidos: sólido (biochar), líquido (bioaceite) y gaseoso (gases como el monóxido de carbono, hidrógeno y metano). La temperatura, el tiempo de residencia y la velocidad de calentamiento son los factores que determinan la aplicación de un tipo de pirólisis u otro. Este proceso es adaptable ya que posibilita ajustar las condiciones para darle prioridad a diferentes productos de acuerdo con las demandas. Además, es una tecnología sostenible dado que emplea biomasa como materia prima y de esta manera genera energía y materiales útiles.

Los tipos de pirólisis son [24]:

- *Pirólisis lenta*: Se distingue por velocidades de calentamiento reducidas y largos periodos de residencia, lo que incrementa la producción de biochar.
- *Pirólisis rápida*: Se lleva a cabo con velocidades elevadas de calentamiento y breves periodos de residencia, centrando su atención en la fabricación de bioaceites.
- *Pirólisis flash*: Un procedimiento extremadamente veloz que produce principalmente gases y bioaceites en milisegundos.
- *Pirólisis asistida por microondas*: utiliza energía de microondas para calentar directamente la biomasa de manera rápida y homogénea, a través del calor dieléctrico que provoca la rotación de moléculas dipolares.

2.4.2 Torrefacción

La torrefacción es un método bastante contemporáneo que implica calentar la biomasa, como madera, desechos y cultivos, a temperaturas de 200 a 300 °C sin oxígeno. En este proceso de calentamiento gradual, la biomasa pierde sustancias volátiles y las hemicelulosas que alberga se degradan. El resultado es un material torrefactado que se distingue por ser seco, estable, más sencillo de triturar y menos propenso a deteriorarse biológicamente durante su almacenaje [24].

Además, se encarga de potenciar sus características ya que disminuye su contenido de fibras, aumenta su capacidad calorífica y es capaz de resistir a la degradación. No obstante, estos métodos presentan complejidades adicionales, como el consumo energético y el desgaste de las herramientas utilizadas en el proceso, lo que subraya la necesidad de perfeccionar su eficiencia para aplicaciones industriales [24].

2.4.3 Gasificación

La gasificación es un procedimiento termoquímico que transforma materiales carbonosos, como la biomasa, en un gas combustible a través de reacciones a elevadas temperaturas (usualmente superiores a 700 °C) en un entorno con escasez de oxígeno o vapor (véase la Figura 2-8) [26]. Este gas, también llamado gas de síntesis o gas sintético (syngas), se compone principalmente de monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H_2), metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). El syngas es adaptable y puede emplearse como combustible, como origen de hidrógeno o como ingrediente para la elaboración de sustancias químicas [23]. Las reacciones clave que ocurren comprenden la combustión parcial, la

transformación de carbono en vapor de agua y la restauración del equilibrio entre CO y H_2). a través de reacciones con vapor. Este procedimiento se distingue por su eficacia energética y su capacidad para producir energía renovable cuando la materia prima es biomasa. Además, posibilita el uso de materiales que, de otra forma, serían descartados, minimizando el efecto en el medio ambiente.

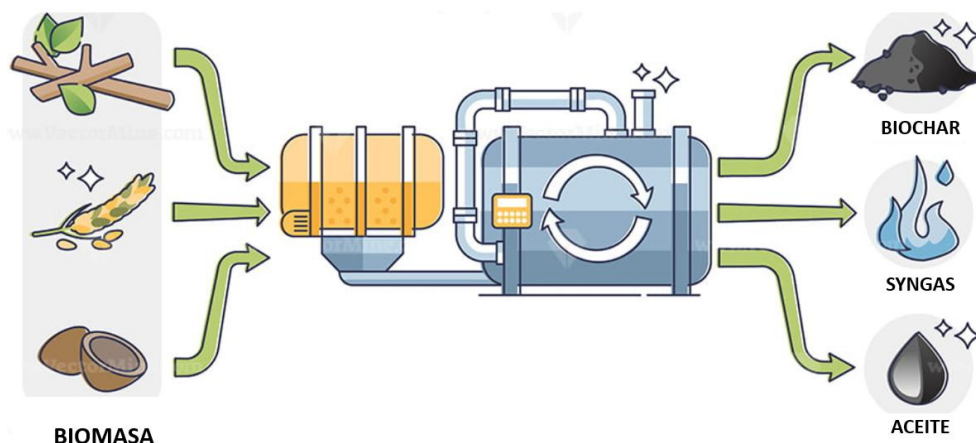


Figura 2-8 Gasificación

2.4.4 Carbonización hidrotermal (HTC)

La carbonización hidrotermal (HTC) convierte biomasa húmeda en hidrochar sin necesidad de secado previo, operando a temperaturas moderadas ($180\text{-}250\text{ }^{\circ}\text{C}$) y alta presión. Sus ventajas incluyen el aprovechamiento de residuos húmedos, reducción de emisiones y mayor estabilidad del carbono. Además, su menor temperatura de operación la hace más segura que otros métodos [28]. Desde el punto de vista ambiental, fomenta la economía circular y contribuye a la mitigación del cambio climático (Figura 2-9).

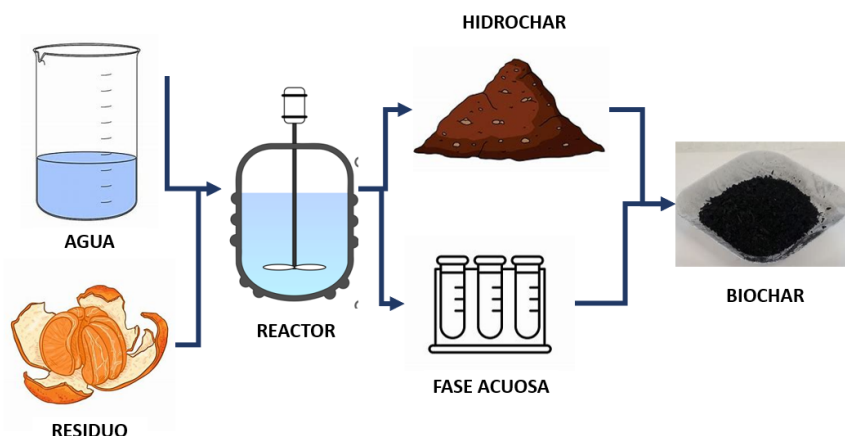


Figura 2-9 Proceso HTC

Tras el análisis de los métodos existentes para la obtención de biochar, se ha optado por emplear dos enfoques: un método en seco, basado en la pirólisis asistida por microondas, y un método en húmedo, mediante carbonización hidrotermal (HTC).

La pirólisis asistida por microondas se presenta como alternativa innovadora dentro los procesos termoquímicos, destacando por su capacidad de calentamiento uniforme, rápido y eficiente mediante energía de microondas. Los estudios actuales ([26], [23], [29]) han demostrado resultados prometedores, obteniendo biochar con propiedades mejoras, como una mayor porosidad y contenido en carbono, lo que amplía su potencial en diversas aplicaciones.

Por otro lado, la carbonización hidrotermal permite la transformación de biomasa con alto contenido de humedad en hidrochar que, tras un tratamiento posterior, puede convertirse en biochar.

La combinación de ambos procesos permite comparar y optimizar la producción de biochar, evaluando sus características y posibles aplicaciones en función del proceso empleado. Pirólisis asistida por microondas

2.5 Pirólisis asistida por microondas

La pirólisis asistida por microondas se caracteriza por su habilidad para calentar de forma directa, eficaz y homogénea la biomasa a través del calentamiento dieléctrico. Este procedimiento emplea microondas para provocar la rotación dipolar de las moléculas en el material, provocando una variación de temperatura volumétrica y uniforme [27]. En contraste con los métodos tradicionales, donde la transferencia de calor está restringida por la conductividad térmica, las microondas transmiten energía directamente al material, lo que posibilita velocidades de calentamiento significativamente superiores y un gradiente térmico más reducido en la muestra.

Las ventajas principales de este tipo de procedimiento son [27]:

- Calentamiento acelerado y volumétrico, desde la parte interna del material hacia la externa.
- Transmisión de energía sin interacción directa, lo que disminuye las pérdidas térmicas.
- Selectividad en la temperatura, perfecta para materiales con escasa conductividad térmica.
- Operación segura y de fácil automatización, con tiempos rápidos de inicio y cierre.

Debido a estas propiedades, la pirólisis asistida por microondas resulta especialmente efectiva en la evaluación de biomasa, dado que facilita un control exacto de las condiciones del proceso, mejorando la calidad del biochar generado. Estudios recientes ([30] [27]) subrayan que este procedimiento sobrepasa al calentamiento tradicional en eficiencia, habilidad para personalizarse y sostenibilidad.

2.6 Carbonización hidrotermal (HTC)

La carbonización hidrotermal (HTC) es un proceso termoquímico que transforma la biomasa húmeda en hidrochar bajo condiciones de temperaturas moderadas (180-250 °C) y elevada presión (10-40 bares), evitando la necesidad de secado previo [28]. Los productos y reacciones pueden variar dependiendo de la temperatura empleada durante la carbonización hidrotermal. A temperaturas bajas (180-200 °C), el hidrochar, rico en carbono fijo, predomina en los líquidos que poseen ácidos orgánicos. Bajo temperaturas moderadas (200-250 °C), el hidrochar posee un mayor porcentaje de carbono aromático, al tiempo que se incrementan líquidos y gases como el CO₂. A temperaturas elevadas (>250 °C), los líquidos aromáticos y los gases (CO₂, H₂, CH₄) son los más predominantes, con un rendimiento inferior de hidrochar a causa de la polimerización y desmetilación. Estas diferencias facilitan la modificación de las condiciones para perfeccionar los productos de acuerdo con su utilización [28].

Los beneficios fundamentales que proporciona este método y que lo distinguen principalmente de los demás métodos son los siguientes [31]:

- Aprovechamiento de biomasa húmeda: No requiere secado previo, lo que disminuye los costes energéticos y operativos en comparación con la pirólisis y la gasificación.
- Disminución de la liberación de gases de efecto invernadero: Funciona en un ambiente confinado, reduciendo al mínimo las emisiones de CO₂ y otros gases perjudiciales durante el proceso.
- Estabilidad del carbono: El hidrochar posee un elevado porcentaje de carbono fijo y una estructura aromática más constante, lo que lo convierte en la opción perfecta para el almacenamiento de carbono a largo plazo.

- Condiciones de operación más seguras: Opera a temperaturas inferiores (180-250 °C) en comparación con la pirólisis (400-700 °C) o la gasificación (700-1000 °C), lo que reduce riesgos operativos.
- Impacto ambiental: La HTC aporta de manera considerable a la mitigación del cambio climático al capturar carbono en el hidrochar y disminuir las emisiones producidas por la degradación de desechos orgánicos. Adicionalmente, promueve el reaprovechamiento de subproductos y disminuye la demanda de extracción de recursos frescos, en consonancia con los fundamentos de la economía circular

Para comprender las diferencias entre los métodos de obtención de biochar, en la Tabla 2-2 se muestran recopilados de distintos estudios en los que se ha empleado pirólisis asistida por microondas, carbonización hidrotermal con autoclave y HTC convencional. Esta recopilación permite comparar las condiciones de operaciones y el porcentaje de carbono fijo obtenido en investigaciones previas.

Residuo	Técnica	Condiciones de operación	Carbono Fijo	Referencia
Cáscara de mazorca de cacao	Pirólisis asistida por microondas	600 W/720 W 10, 15 o 20 minutos	40-55 %	[32]
Serrín de madera de pino	Pirólisis asistida por microondas	800 W 20 minutos	79,20 %	[33]
Paja de arroz	Pirólisis asistida por microondas	200 W 15-30 minutos	< 20 %	[34]
Cañamiza	HTC con autoclave	200 °C 24 h Ácido fosfórico	76-88 %	[35]
Hojas de cebolla	HTC con autoclave	105 °C 3 h	11,53 %	[28]
Cáscara de arveja	HTC con autoclave		12,65 %	[28]
Hueso de ciruela	HTC con autoclave	215 °C 20 h	69,80 %	[36]
Hueso de cereza	HTC con autoclave		67,40 %	[36]
Estiércol	HTC convencional	220 °C 1 h	17,32 %	[37]
Hueso de aceituna	HTC convencional	200 °C 1 h	67,80 %	[38]

Tabla 2-2 Comparativa de métodos entre los distintos residuos

En términos generales, el método de HTC con autoclave es el que mejores resultados de carbono fijo obtiene, teniendo en cuenta temperaturas elevadas y tiempos prolongados, como en el caso de los huesos de ciruela o cereza (>67 %) cañamiza (76-88 %) aunque destacar que en este caso se utilizó ácido fosfórico para aumentar el contenido de carbono fijo. Sin embargo, en residuos tratados a menores temperaturas y tiempo más cortos como las cáscaras de cebolla y arveja, se observan valores de carbono notablemente inferiores.

Por otro lado, en pirólisis asistida por microondas, se aprecian resultados de carbono fijo bastante elevados, destacando el serrín de madera de pino (79,2 % a 800 W). No obstante, en potencias inferiores

(200 W) y tiempos más cortos, se observan porcentajes por debajo del 20 %, como se puede observar en la paja de arroz.

Finalmente, el HTC convencional presenta valores dispares dependiendo del tipo de residuo, ya que, bajo mismas condiciones de temperatura y tiempo, los porcentajes de carbono varían significativamente. Esto sugiere que la composición química del residuo influye en la eficiencia del proceso, independientemente de los parámetros empleados.

3 DESARROLLO DEL TFG

Este apartado detalla los ensayos efectuados en el laboratorio, incluyendo los métodos de caracterización empleados para determinar las propiedades de los materiales, así como los equipos utilizados en el proceso. La Figura 3-1 muestra un esquema visual del procedimiento seguido para obtener biochar por medio de pirólisis asistida por microondas. El proceso comienza con la recogida de cuatro tipos de residuos orgánicos, abundantes en la Escuela Naval Militar de Marín, los cuales son sometidos a un pretratamiento (secado y triturado) y caracterización inicial. Posteriormente, los residuos son procesados mediante pirólisis asistida por microondas (MW), aplicando diferentes niveles de potencia para valorar la potencia más eficiente.

Por otra parte, se seleccionan esos mismos residuos para ser tratados mediante carbonización hidrotermal. A diferencia del método anterior, estos materiales no requieren pretratamiento y son sometidos a este proceso, seguido de un secado posterior. El proceso seguido con esta metodología es descrito en la Figura 3-2.

Como resultado, se consigue comparar ambos biochar obtenidos, evaluando propiedades físicas y químicas para determinar su viabilidad en distintas aplicaciones.

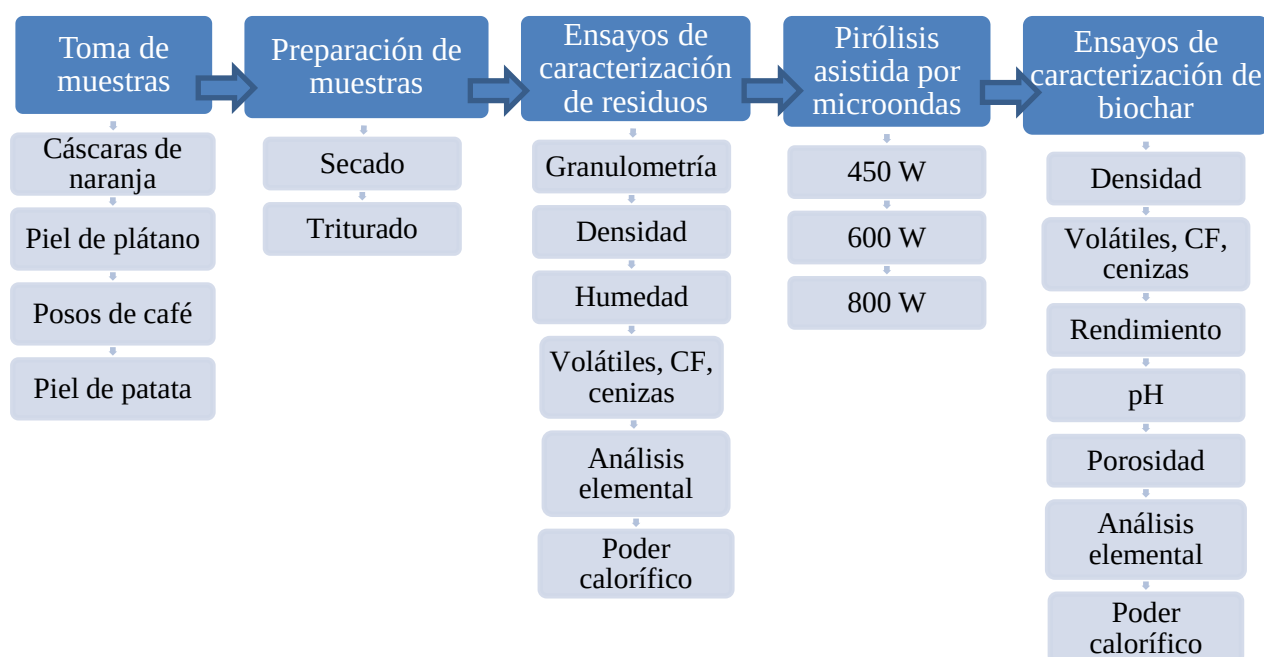


Figura 3-1 Metodología seguida en la pirólisis asistida por microondas

En la Figura 3-2 se observa el proceso de obtención de biochar mediante carbonización hidrotermal.

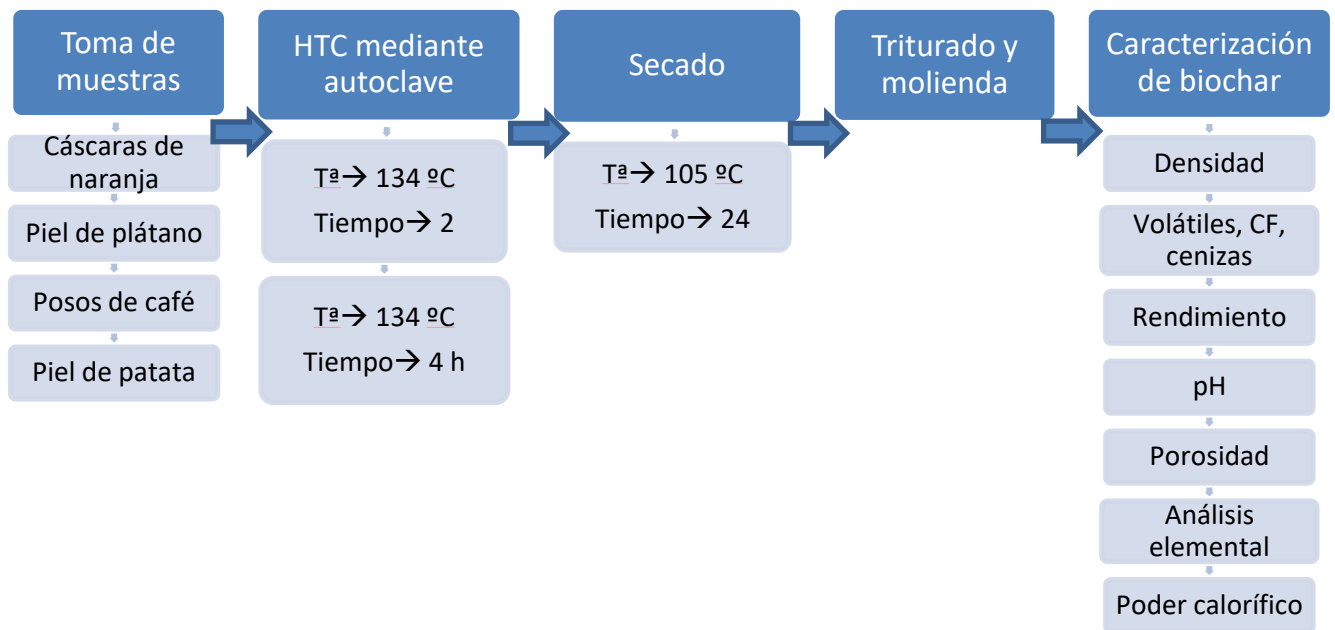


Figura 3-2 Metodología seguida en la carbonización hidrotermal con autoclave

Para llevar a cabo los ensayos, la selección y caracterización de los residuos resulta un paso fundamental, ya que las propiedades iniciales de la materia prima influyen directamente en la calidad y rendimiento del biochar obtenido. La elección de los residuos se ha basado en estudios previos [39], priorizando aquellos con mayor contenido en carbono y potencial de valorización. A continuación, se presentan los materiales empleados en el estudio y su relevancia en el proceso de producción de biochar.

3.1 Residuos empleados

Para el desarrollo de este trabajo se ha tomado como referencia el Trabajo de Fin de Grado (TFG) de Gonzalo Castellanos [39]. Con base en sus resultados, se han seleccionado los cuatro residuos con mayor rendimiento y contenido de carbono: cáscara de naranja, posos de café, piel de plátano y munda de patata (véase en la Figura 3-3). Estos residuos han sido caracterizados y valorizados mediante pirólisis asistida por microondas, aplicando diferentes potencias y por carbonización hidrotermal. Como resultado, se ha obtenido un biochar cuyas características más relevantes han sido analizadas y estudiadas para evaluar su potencial en diversas aplicaciones.



Figura 3-3 Residuos estudiados

Los residuos seleccionados destacan por ser fácilmente accesibles en la ENM y en el CUD de Marín, lo que facilita su uso en procesos de valorización. La reutilización de estos residuos no solo permite

darles un nuevo propósito, sino que también ayuda a reducir la cantidad de desechos y a impulsar un modelo más sostenible basado en la economía circular.

3.2 Preparación de las muestras

Las cáscaras de naranja y los posos de café fueron recogidos en la cámara de oficiales del Centro Universitario de la Defensa, mientras que las cáscaras de plátano y la piel de patata fueron proporcionadas por el comedor de alumnos de la Escuela Naval Militar. Dependiendo del método empleado, los residuos fueron pretratados de manera diferente.

Para los ensayos de pirólisis, se llevó a cabo un pretratamiento de secado con el objetivo de eliminar la humedad en los residuos (Figura 3-4). Este proceso se realizó en una estufa (INDELAB FI.80) a una temperatura de 105 °C donde permanecieron 24 horas. Posteriormente, los materiales fueron triturados y tamizados. En el caso de la cáscara de naranja y los posos de café, se seleccionaron granulometrías inferiores a 1 mm, sin embargo, para la piel de patata y la cáscara de plátano se escogió un rango de 1-2 mm, debido a que en los primeros ensayos se observó que con granulometrías menores el residuo se calcinaba, invalidando el ensayo. Finalmente, los residuos fueron caracterizados y almacenados en recipientes herméticos hasta su posterior utilización en los ensayos experimentales.



Figura 3-4 Secado de muestras

Para los ensayos de carbonización hidrottermal, no fue necesario realizar una etapa previa de secado y triturado, ya que los residuos fueron introducidos directamente en el Autoclave (J.P.Selecta,s.a) sin necesidad de pretratamiento.

3.3 Ensayos de caracterización

3.3.1 Granulometría

Se evaluó la distribución granulométrica de las materias primas mediante tamices con malla entre 0,05 y 4 mm. Se prepararon muestras de 50 a 200 gramos, que se tamizaron secuencialmente desde la malla de mayor a menor abertura. Posteriormente, se calculó el porcentaje de material retenido en cada tamiz, obteniendo así la distribución granulométrica del material. Este análisis permitió establecer un criterio común para seleccionar la granulometría adecuada en los ensayos de pirólisis asistida por microondas, ya que el tamaño de partícula influye en la eficiencia del proceso y en las características del biochar obtenido.

3.3.2 Densidad

La densidad se define como la cantidad de materia (m) contenida en un volumen específico (v). Para calcular este parámetro se utilizó una probeta registrando la masa del residuo introducido hasta alcanzar un volumen predefinido. En todos los ensayos se estableció un volumen estándar de 0,01 L, con el

propósito de facilitar la comparación entre muestras. El resultado de la densidad (d) del compuesto viene dado por la ecuación 3-1. Para garantizar la precisión de los resultados, el procedimiento se llevó a cabo por duplicado.

$$d(g/ml) = m \div v \quad \text{Ecuación 3-1}$$

3.3.3 Análisis inmediato

Para determinar el contenido de material volátil, carbono fijo (CF) y cenizas, se han utilizado cuatro crisoles, uno para cada residuo, siguiendo el procedimiento detallado a continuación:

- Preparación de muestras: se pesan los crisoles vacíos (m_c) y se añade aproximadamente 0,5 g de material seco (m_{seco}) en cada uno.
- Calcinación inicial: Los crisoles se cubren con sus tapas de cerámica y se introducen en la mufla (Nabertherm) (Figura 3-5) a 750 °C durante 7 minutos.
- Enfriamiento y determinación de volátiles: Finalizado este tiempo, los crisoles se introducen en un desecador para alcanzar nuevamente la temperatura ambiente. Posteriormente, se pesan otra vez para determinar la pérdida de masa atribuida a los compuesto volátiles.
- Calcinación final: Los crisoles se someten a una segunda calcinación a 750 °C durante 2 horas, eliminando completamente el carbono presente en la muestra. Es importante señalar que, para verificar que no se producía una pérdida de masa en el crisol tras permanecer durante 2 horas en la mufla, se realizaron ensayos con crisoles vacíos. Estos ensayos confirmaron que el material del crisol no sufría variaciones de peso durante el proceso.
- Determinación de cenizas y cálculos del carbono fijo: Tras la calcinación, se obtienen cenizas, cuya masa final (m_{ash}) se registra. Como resultado, el contenido en carbono fijo se obtiene restando al 100 % la masa de cenizas y de volátiles.



Figura 3-5 Mufla

3.3.4 Análisis elemental del biochar

El análisis elemental permite determinar la composición química de una sustancia en términos de carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N) y azufre (S), mientras que el contenido de oxígeno (O) se calcula por diferencia con respecto al 100 % de la muestra. En este estudio, se analizó tanto la materia prima como los biochar obtenidos tras la carbonización hidrotermal para evaluar su evolución química.

Las muestras fueron enviadas al Centro de Apoyo Científico-Tecnológico a la Investigación (CACTI) de la Universidad de Vigo, donde se realizó la caracterización elemental mediante un analizador elemental Flash Smart CHNS. El procedimiento consistió en pesar aproximadamente 1,5 mg

de muestra en cápsulas de estaño de 5x3,5 mm, utilizando una microbalanza analítica Mettler Toledo Modelo MX5, con una sensibilidad de $1,5 \times 10^{-6}$ g.

El análisis se llevó a cabo en un analizador elemental Flash Smart CHNS Thermo Fisher, perteneciente al Servicio de Seguridad Alimentaria y Desarrollo Sostenible del CACTI. Para la combustión de las muestras se emplearon flujos de 120 ml/min de helio (He) como gas portador y 250 mL/min de oxígeno (O₂) como agente oxidante.

El método de análisis se basa en una combustión flash, en la que la muestra se oxida instantáneamente, transformando sus componentes en gases de combustión. Estos gases son transportados a través de un horno de reducción y posteriormente separados en una columna cromatográfica, donde cada elemento es identificado individualmente. Finalmente, los gases son detectados mediante un detector de conductividad térmica (TCD), proporcionando una señal proporcional a la concentración de cada componente presente en la muestra.

3.3.5 Poder calorífico

El poder calorífico de un combustible indica la cantidad de energía que se libera por unidad de masa durante una combustión completa. Este parámetro es fundamental para evaluar el potencial energético de diferentes tipos de biochar. Para estimar el poder calorífico superior (PCS), expresado en kcal/kg, se emplea la fórmula de Dulong ([23]) para combustibles sólidos y líquidos, que se expresa de la siguiente manera:

$$PCS = 8100 \times C + 34400 \times (H - 0,8) + 2500 \times S \quad \text{Ecuación 3-2}$$

Donde C, H, O y S son los % de cada uno de los elementos obtenidos por análisis elemental.

3.4 Ensayos de pirólisis asistida por microondas

Para los ensayos de pirólisis asistida por microondas se ha utilizado un microondas (Samsung, MG2343515AS) (Figura 3-6) además de la mufla mencionada anteriormente.



Figura 3-6 Microondas

El procedimiento comienza con la preparación de 4 g de residuo colocados en una cápsula de porcelana, con las granulometrías mencionadas anteriormente. A continuación, se selecciona la potencia inicial del ensayo (450 W, 600 W u 800 W).

El ensayo se lleva a cabo mediante exposiciones controladas en un microondas, aplicando intervalos de 15-30 segundos, tras los cuales el crisol es retirado para observar la evolución del residuo a medida que se acumula el tiempo de exposición. El proceso finaliza cuando el material experimenta un cambio de color hacia un tono más oscuro y carbonoso, indicando la conversión en biochar.

A continuación, se muestra una foto del antes y después del ensayo (Figura 3-7, Figura 3-8, Figura 3-9 y Figura 3-10):



Figura 3-7 Cáscara de naranja



Figura 3-8 Posos de café



Figura 3-9 Cáscara de plátano



Figura 3-10 Piel de patata

El tiempo total de exposición varió en función del tipo de residuo y la potencia aplicada durante el proceso de pirólisis asistida por microondas. Sin embargo, en el caso específico de la cáscara de plátano y la piel de patata, se observó que, con un tamaño de partícula inferior a 1 mm, el residuo se ponía al rojo vivo, lo que podía resultar peligroso por lo que se decidió aumentar la granulometría de estos residuos a un rango de 1 a 2 mm, permitiendo un mejor control del proceso de pirólisis.

Dado que este método aún se encuentra en desarrollo y cuenta con pocos estudios previos, se decidió evaluar tres niveles de potencia en cada residuo con el objetivo de determinar la más adecuada. Para ello, se analizó principalmente la cantidad de carbono fijo generado y el rendimiento de biochar en cada caso. Una vez identificada la potencia óptima para cada residuo, se realizaron ensayos adicionales para corroborar la repetibilidad de los resultados.

En la Tabla 3-1 se presentan, de manera resumida, los diferentes ensayos llevados a cabo donde se incluye los intervalos de tiempo empleados y el número de ensayos realizados para cada residuo, considerando las adaptaciones implementadas en función de su comportamiento durante el proceso.

Ensayo	Residuo	Potencia	Tiempo	Granulometría
1	Cáscara de naranja	450 W	70	<1 mm
2	Cáscara de naranja	450 W	65	<1 mm
3	Cáscara de naranja	600 W	40	< 1mm
4	Cáscara de naranja	800 W	26	<1mm
5	Piel de plátano	450 W	35	< 1mm
6	Piel de plátano	600 W	21	<1 mm
7	Piel de plátano	800 W	30	<1 mm
8	Piel de plátano	450 W	70	1 mm- 2 mm
9	Piel de plátano	600 W	50	1 mm- 2 mm
10	Piel de plátano	800 W	30	1 mm- 2 mm
11	Posos de café	450 W	69	<1 mm
12	Posos de café	600 W	50	<1 mm
13	Posos de café	800 W	27	<1 mm
14	Piel de patata	450 W	50	<1 mm
15	Piel de patata	600 W	28	<1 mm
16	Piel de patata	800 W	74	<1 mm
17	Piel de patata	450 W	70	1 mm- 2 mm
18	Piel de patata	600 W	50	1 mm- 2 mm
19	Piel de patata	800 W	30	1 mm- 2 mm

Tabla 3-1 Ensayos: pirólisis asistida por microondas

3.5 Ensayos de carbonización hidrotermal

Para llevar a cabo los ensayos de carbonización hidrotermal, se utilizó un autoclave (J.P.Selecta, s.a) (véase en la Figura 3-11). Este equipo opera bajo altas temperaturas y presiones, proporcionando un entorno controlado ideal para reacciones de estas características. Estas condiciones permiten la síntesis de nuevos materiales y el estudio del comportamiento de estos en entornos extremos.



Figura 3-11 Autoclave

Para la carbonización hidrotermal, no es necesario realizar un pretratamiento de los residuos, por lo que se emplearon las cáscaras de naranja, cáscaras de plátano, piel de patata y posos de café tal cual fueron recogidos, sin secado ni trituración previa.

La cantidad de material utilizada en cada ensayo varió entre 200 g y 500 g, y para cada residuo se realizaron dos ensayos. En el primero, el residuo se sometió a 2 horas de tratamiento en el autoclave a una temperatura de 134 °C, con intervalos de 1 hora. Una vez finalizado el ciclo, los residuos fueron dejados en reposo durante 15 minutos para eliminar parte de la humedad antes de su manipulación.

En el segundo ensayo, el procedimiento fue idéntico, con la única diferencia de que el tiempo de tratamiento en el autoclave se extendió a 4 horas, manteniendo los mismos intervalos de 1 hora. En ambos casos, al finalizar los ciclos, la biomasa experimentó un aumento notable en su contenido de humedad, acompañado de cambios en su color y textura, evidenciando la transformación estructural del material (véase en Figura 3-12, Figura 3-13, Figura 3-14 y Figura 3-15).



Figura 3-12 Cáscara de naranja antes y después de la carbonización hidrotermal



Figura 3-13 Cáscara de plátano antes y después de la carbonización hidrotermal



Figura 3-14 Posos de café antes y después de la carbonización hidrotermal



Figura 3-15 Piel de patata antes y después de la carbonización hidrotermal

Tras el período de 15 minutos de reposo posterior a la carbonización hidrotermal, los residuos fueron trasladados a una estufa a 105 °C, donde se mantuvieron durante al menos 24 horas con el fin de eliminar completamente la humedad residual. Este proceso de secado es esencial para estabilizar el material y asegurar su caracterización en condiciones homogéneas (véase en Figura 3-16, Figura 3-17, Figura 3-18 y Figura 3-19).



Figura 3-16 Cáscara de naranja antes y después de la estufa



Figura 3-17 Cáscara de plátano antes y después de la estufa



Figura 3-18 Posos de café antes y después de la estufa



Figura 3-19 Piel de patata antes y después de la estufa

Durante esta etapa, se observaron nuevos cambios en las propiedades del material, especialmente en su color y textura. Los residuos adquirieron un tono más oscuro, lo que indica una transformación química adicional derivada del proceso térmico. Estos cambios pueden estar relacionados con la consolidación de la estructura carbonosa y la eliminación de compuestos volátiles remanentes [23], aspectos que serán analizados en la caracterización posterior del biochar obtenido.

A continuación, en la Tabla 3-2 se muestran los diferentes ensayos realizados mediante carbonización hidrotermal:

Ensayo	Residuo	Temperatura	Tiempo
1	Cáscara de naranja	132 °C	2 h
2	Cáscara de naranja	132 °C	4 h
3	Piel de plátano	132 °C	2 h
4	Piel de plátano	132 °C	4 h
5	Posos de café	132 °C	2 h
6	Posos de café	132 °C	4 h
7	Piel de patata	132 °C	2 h
8	Piel de patata	132 °C	4 h
9	Piel de patata	132 °C	2 h
10	Piel de patata	132 °C	4 h

Tabla 3-2 Ensayos: HTC con autoclave

Cabe destacar que el ensayo con piel de patata tuvo que repetirse, ya que en la primera prueba se introdujo el residuo sin utilizar placas de Petri, lo que provocó que gran parte del material quedara adherido al fondo del autoclave.

Por último, una vez finalizado el proceso de secado en la estufa, los residuos fueron triturados y tamizados para homogeneizar el material antes de su caracterización. Este procedimiento permitió analizar las propiedades del biochar obtenido, determinando su rendimiento y contenido de carbono fijo, entre otras, parámetros fundamentales para evaluar la calidad y eficiencia del proceso de producción.

3.6 Caracterización del biochar

Se realizaron una serie de mediciones para caracterizar las propiedades de los biochar obtenidos, incluyendo granulometría, densidad, análisis inmediato (contenido de volátiles, carbono fijo y cenizas) y poder calorífico, siguiendo los procedimientos detallados en el apartado 3.3. Además, se determinaron otras propiedades, las cuales se describen a continuación.

3.6.1 Densidad y porosidad

Para determinar la densidad del biochar, es fundamental considerar su relación con la porosidad del material. La densidad aparente, también conocida como densidad volumétrica, corresponde a la relación entre la masa y el volumen ocupado por este producto sólido, incluyendo los espacios porosos existentes. Esta propiedad depende del estado del material, ya que puede variar en función del grado de compactación [23]. Asimismo, la porosidad es la propiedad de un material vinculada a los espacios vacíos de los que dispone en su superficie o estructura [23].

Para determinar este parámetro, inicialmente, se pesó una probeta vacía (M_1), a la cual se añadió el biochar obtenido (M_2), permitiendo así determinar el volumen que ocupa (V_2). Posteriormente, se llenó la probeta con agua hasta cubrir completamente el biochar, enrasando el nivel del líquido con el material. Finalmente, se registró la masa total del conjunto (M_3), y a partir de estos valores, se realizaron los cálculos correspondientes.

$$M.\text{biochar}(g) = M_2 - M_1 \quad \text{Ecuación 3-3}$$

$$M.\text{agua}(g) = M_3 - M_2 \quad \text{Ecuación 3-4}$$

$$V.\text{agua}(ml) = M.\text{agua} \div \text{Densidad}.\text{agua} \quad \text{Ecuación 3-5}$$

$$V.\text{biochar}.\text{real}(ml) = V_2 - V.\text{agua} \quad \text{Ecuación 3-6}$$

A partir de estos datos se determinaron las siguientes propiedades:

$$\bullet \quad \text{Densidad aparente } (g/ml) = M.\text{biochar} \div V_2 \quad \text{Ecuación 3-7}$$

$$\bullet \quad \text{Porosidad } (\%) = (V.\text{agua} \div V_2) \times 100 \quad \text{Ecuación 3-8}$$

$$\bullet \quad \text{Densidad biochar real } (g/ml) = M.\text{biochar} \div V.\text{biochar}.\text{real} \quad \text{Ecuación 3-9}$$

3.6.2 Rendimiento del biochar

El rendimiento del biochar representa la cantidad de biochar obtenida en relación con la biomasa utilizada en el proceso de producción de biochar. Este cálculo se expresa generalmente en porcentaje y permite evaluar la eficiencia del método de producción. Para su determinación, se compara la masa inicial de la biomasa seca con la masa final del biochar obtenido tras el proceso. La ecuación utilizada es:

$$Rendimiento(\%) = \left(\frac{m_{biochar} \times (100 - Humedad_{biochar})}{m_{biomasa} \times (100 - Humedad_{biomasa})} \right) \times 100$$

Ecuación 3-10

Este cálculo es fundamental para analizar la conversación de la materia prima y optimizar las condiciones del proceso de producción [40].

3.6.3 pH

El pH es un parámetro que determina el grado de acidez o alcalinidad de una sustancia en una escala logarítmica de 0 a 14, donde el valor de 7 indica una solución neutra. Un pH inferior a 7 corresponde a una solución ácida, mientras que un pH superior a 7 indica una solución básica [23]. Para su determinación, se utilizan medidores de pH (Hanna, Edge) dispositivos con sensores que genera una señal eléctrica proporcional al pH de la muestra, la cual es procesada y posteriormente mostrada en una pantalla (véase en Figura 3-20).



Figura 3-20 Medición de pH

3.6.4 Análisis estadístico ANOVA

Tras obtener los resultados de los distintos ensayos, se llevó a cabo un análisis estadístico mediante ANOVA de dos factores con una única muestra por grupo, utilizando la herramienta de Excel (Figura 3-21).

El análisis de varianza (ANOVA) de dos factores permite evaluar si existen diferencias significativas entre grupos en función de dos variables independientes. Para este trabajo, se analizó el efecto de la potencia de MW y el tipo de compuesto sobre los resultados obtenidos en los ensayos de pirólisis asistida por microondas. Mientras que en el caso de la carbonización hidrotermal se estudió el efecto del tiempo y el tipo de residuo. El procedimiento seguido en el análisis comprende los siguientes pasos:

- Definición de variables: Se establecen la potencia/tiempo y el tipo de compuesto como variables independientes, mientras que los valores obtenidos en las mediciones corresponden a la variable dependiente.
- Diseño experimental: Se organizan los grupos experimentales en función de las diferentes combinaciones de temperatura y tipo de compuesto, permitiendo evaluar su impacto en los resultados.

A	B	C	D	E
Densidad (pirólisis asistida por microondas)	Residuos	450 W	600 W	800 W
Cáscara de naranja	0,28	0,24	0,26	0,23
Piel de plátano	0,31	0,36	0,36	0,31
Posos de café	0,33	0,27	0,28	0,41
Piel de patata	0,49	0,41	0,41	0,50

XLMiner Analysis ToolPak

Anova: Single Factor
 Anova: Two-Factor With Replication
 Anova: Two-Factor Without Replication

 Input Range: \$A\$2:\$E\$6
☒ Labels in First Row
 Alpha: 0.05
 Output Range: \$A\$9
 OK

Figura 3-21 Análisis ANOVA

Se estableció un nivel de significancia del 0,05, lo que implica que, si el valor p (probabilidad de obtener un resultado igual o mayor que el observado, si la hipótesis nula es cierta) es menor que 0,05, se rechaza la hipótesis nula y se concluye que existen diferencias significativas entre los grupos evaluados.

En caso de que el análisis revele diferencias significativas, se interpreta que la potencia, el tiempo y/o el tipo de compuesto tienen un impacto directo en los resultados. Por el contrario, si no se detectan diferencias significativas, se concluye que estas variables no influyen de manera relevante en los valores obtenidos.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se presentan los resultados específicos obtenidos en los procesos de pirólisis asistida por microondas y carbonización hidrotermal para cada tipo de residuo. Posteriormente, se realizó un análisis estadístico de varianza con el objetivo de evaluar el comportamiento global del conjunto de residuos y determinar la influencia de la potencia de microondas/tiempo de permanencia en el autoclave y la naturaleza del material de origen en los resultados obtenidos. Además, se compararán los resultados obtenidos con los de la técnica de carbonización hidrotermal convencional (HTC) llevada a cabo en un trabajo previo ([39]) para ampliar el análisis. Finalmente, se abordarán las posibles aplicaciones del biochar obtenido en función de sus características.

En primer lugar, se presentan las tablas con los ensayos realizados para cada método, mostrando aquellos seleccionados para su análisis posterior (sombreados en verde). Además, se indican aquellos ensayos que han sido descartados debido a la presencia de datos anómalos (sombreados en rojo)

En la Tabla 4-1, se pueden observar que aquellos ensayos de pirólisis asistida por microondas que fueron descartados han sido los siguientes: 1, 5, 6, 7, 14, 15 y 16, debido a incongruencias en los resultados o problemas en la ejecución del procedimiento.

Ensayo	Residuo	Potencia	Tiempo	Granulometría
1	Cáscara de naranja	450 W	70	<1 mm
2	Cáscara de naranja	450 W	65	<1 mm
3	Cáscara de naranja	600 W	40	< 1mm
4	Cáscara de naranja	800 W	26	<1mm
5	Piel de plátano	450 W	35	< 1mm
6	Piel de plátano	600 W	21	<1 mm
7	Piel de plátano	800 W	30	<1 mm
8	Piel de plátano	450 W	70	1 mm- 2 mm
9	Piel de plátano	600 W	50	1 mm- 2 mm
10	Piel de plátano	800 W	30	1 mm- 2 mm
11	Posos de café	450 W	69	<1 mm
12	Posos de café	600 W	50	<1 mm
13	Posos de café	800 W	27	<1 mm
14	Piel de patata	450 W	50	<1 mm
15	Piel de patata	600 W	28	<1 mm
16	Piel de patata	800 W	74	<1 mm
17	Piel de patata	450 W	70	1 mm- 2 mm
18	Piel de patata	600 W	50	1 mm- 2 mm
19	Piel de patata	800 W	30	1 mm- 2 mm

Tabla 4-1 Ensayos: pirólisis asistida por microonda

En el caso de la pirólisis asistida por microondas, se observó que, en el primer ensayo de cáscara de naranja a 450 W (ensayo 1), los resultados de carbono fijo y rendimiento obtenidos no eran fiables, ya que mostraban valores anómalos. Esto pudo deberse a que fue el primer ensayo realizado y aún no se tenía un método de trabajo completamente definido. Por ello, se decidió repetir el ensayo, tomando como referencia el segundo ensayo de la cáscara de naranja para el análisis.

En cuanto a la piel de plátano y piel de patata, se detectó que, al utilizar una granulometría inferior a 1 mm, ambos residuos tendían a combustionar incluso con intervalos de exposición de 5-10 segundos dentro del microondas. Además, al caracterizarlos, los resultados obtenidos también fueron atípicos. Para solucionar este problema, se optó por aumentar la granulometría en ambos residuos con el objetivo de mejorar la estabilidad del proceso.

Durante los ensayos, se intentó establecer un patrón de tiempos de permanencia en el microondas uniforme para todos los residuos con el fin de facilitar la comparación de los resultados:

- 450 W → 65-70 minutos
- 600 W → 40-60 minutos
- 800 W → 25-40 minutos

Sin embargo, debido a la diferencia en granulometría, la comparación entre residuos no es completamente precisa, ya que, a mayor tamaño de partícula, se requiere un tiempo de pirólisis más prolongado. Aun así, se estableció un criterio común de exposición para evaluar el efecto del tiempo en función de la potencia aplicada, considerando que los resultados podrían verse afectados por esta variación en la granulometría.

La problemática de la granulometría óptima y el tiempo adecuado de pirólisis será abordada en líneas futuras, ya que este método aún se encuentra en desarrollo y no se ha establecido una metodología definitiva. En los siguientes apartados, se analizarán los resultados obtenidos para cada biochar, con el objetivo de determinar qué método ha sido más eficiente en función de cada residuo y plantear posibles mejoras para su implementación en el futuro.

En lo referente al proceso de carbonización hidrotermal llevado a cabo en el autoclave, se puede contemplar en la Tabla 4-2 los ensayos realizados. En ella se detallan los ensayos seleccionados para su análisis posterior, así como aquellos que fueron descartados debido a la presencia de datos anómalos o condiciones que no permitieron obtener resultados representativos.

Ensayo	Residuo	Temperatura	Tiempo
1	Cáscara de naranja	134 °C	2 h
2	Cáscara de naranja	134 °C	4 h
3	Piel de plátano	134 °C	2 h
4	Piel de plátano	134 °C	4 h
5	Posos de café	134 °C	2 h
6	Posos de café	134 °C	4 h
7	Piel de patata	134 °C	2 h
8	Piel de patata	134 °C	4 h
9	Piel de patata	134 °C	2 h
10	Piel de patata	134 °C	4 h

Tabla 4-2 Ensayos HTC con autoclave

En el caso de la carbonización hidrotermal con autoclave, el único ensayo que tuvo que repetirse fue el de la piel de patata, quedando descartados los ensayos 7 y 8, ya que, tal y como se mencionó anteriormente, los residuos no fueron introducidos en placas de Petri, lo que provocó que el residuo quedara adherido al fondo del autoclave, invalidando el ensayo.

4.1 Datos obtenidos

4.1.1 Densidad

La densidad del biochar es un parámetro necesario para evaluar su aplicabilidad en diferentes sectores, ya que influye en su capacidad de adsorción, almacenamiento y transporte. En este estudio, se analizaron las densidades de los residuos iniciales y los biochar obtenidos mediante pirólisis asistida por microondas y carbonización hidrotermal (HTC), cuyos valores se presentan en las Tabla 4-3 y Tabla 4-4.

	Residuo	Densidad (g/mL)		
		450 W	600 W	800 W
Cáscara de naranja	0,28	0,24	0,26	0,23
Piel de plátano	0,31	0,36	0,36	0,31
Posos de café	0,33	0,27	0,28	0,41
Piel de patata	0,49	0,41	0,41	0,50

Tabla 4-3 Densidad del residuo y del biochar obtenido por pirólisis

En la pirólisis asistida por microondas, los valores de densidad muestran variaciones significativas según el tipo de residuo y la potencia aplicada. En general, se observa que la densidad del biochar obtenido es menor en comparación con la del residuo original, lo que sugiere una reducción en la estructura compacta del material debido a la eliminación de materia volátil durante el proceso de pirólisis [19].

El biochar con menor densidad se obtuvo a una potencia de 800 W a partir de cáscara de naranja, con un valor de 0,23 g/mL. Esto indica que este material experimenta una transformación estructural considerable durante la carbonización [19].

Por otro lado, el biochar con mayor densidad se registró en la piel de patata a 800 W, alcanzando un valor de 0,50 g/mL. Este resultado sugiere una menor pérdida de material volátil y una estructura más compacta, lo que indica diferencias en la respuesta de los distintos residuos al proceso de pirólisis asistida por microondas.

En cuanto a la variación entre el residuo y el biochar obtenido, se destaca que la cáscara de naranja presenta la mayor diferencia, pasando de 0,28 g/mL en su estado original a 0,23 g/mL tras la pirólisis a 800 W. Este cambio indica que el proceso afecta notablemente a su estructura, aumentando su porosidad. Por otro lado, los posos de café experimentan un incremento en su densidad, pasando de 0,33 g/mL a 0,41 g/mL al ser tratados con una potencia de 800 W. Este aumento en la densidad podría deberse a la formación de estructuras más compactas durante la pirólisis, posiblemente por la reorganización de los componentes orgánicos y la reducción de porosidad, lo que resulta en un material más denso [41].

Estudios previos han indicado que la densidad del biochar depende de la temperatura de carbonización, la composición química del residuo y el tiempo de residencia en el proceso. A temperaturas más elevadas, los materiales tienden a perder más componentes volátiles, aumentando su porosidad y reduciendo su densidad [42].

A continuación, en la Tabla 4-4 se presentan los valores obtenidos mediante la carbonización hidrotermal (HTC) en autoclave:

	Residuo	Densidad (g/mL)	
		HTC (2h)	HTC (4h)
Cáscara de naranja	0,28	0,802	0,987
Piel de plátano	0,31	0,320	0,330
Posos de café	0,33	0,320	0,514
Piel de patata	0,49	0,741	0,760

Tabla 4-4 Densidad del biochar obtenido por HTC en autoclave

En contraste con la pirólisis, la HTC genera un biochar con densidades considerablemente superiores, lo que coincide con la literatura que señala que este proceso produce materiales más compactos debido a la compresión estructural inducida por la alta presión y la presencia de una fase líquida [43].

El biochar con menor densidad tras carbonización hidrotermal de 2 horas corresponde a piel de plátano y posos de café, ambos exhibiendo un valor de 0,320 g/mL, y, por el contrario, el biochar con mayor densidad se obtuvo en cáscara de naranja tras 4 horas de HTC (0,987 g/mL), reflejando un aumento significativo con respecto a su densidad inicial.

En este caso, la cáscara de naranja también muestra la mayor variación, pasando de 0,28 g/mL de densidad del residuo a 0,987 g/mL tras 4 horas de HTC. Este incremento sugiere una mayor compactación del material en comparación con otros residuos, lo que puede deberse a la transformación química inducida por el agua a alta temperatura y presión [43].

Estos resultados evidencian que el método de producción del biochar afecta directamente a su densidad final. Mientras que la pirólisis favorece la formación de un material más ligero y poroso, la HTC produce biochar más denso y compacto [36].

4.1.2 Humedad inicial residuos

Para la aplicación la técnica de pirólisis asistida por microondas, los residuos fueron sometidos a un proceso de secado previo con el fin de alcanzar un contenido de humedad del 0 %. Por el contrario, en el proceso de carbonización hidrotermal, este tratamiento no fue necesario, empleándose los residuos con su humedad original. En la Tabla 4-5 se presentan los valores de humedad inicial de cada residuo.

Residuo	Humedad (%)
Cáscara de naranja	76,15
Piel de plátano	90,17
Posos de café	62,09
Piel de patata	82,65

Tabla 4-5: Humedad inicial de los residuos para HTC

Se observa que los niveles de humedad son elevados, lo que implicaría un alto consumo energético para lograr un secado completo si estos ensayos se llevaran a cabo a una escala mayor. Sin embargo, el método de HTC con autoclave representa una ventaja en este sentido, ya que permite tratar los residuos directamente, sin necesidad de un secado previo, optimizando así los costos operativos.

4.1.3 pH

El pH del biochar es un parámetro fundamental, ya que influye en su aplicación en suelos y otros usos ambientales. Dependiendo del método de producción y del tipo de biomasa empleada, el biochar puede presentar valores de pH ácidos, neutros o alcalinos, afectando directamente su capacidad para modificar las propiedades químicas del suelo y la disponibilidad de nutrientes [23]. En las siguientes tablas se presentan los valores de pH obtenidos en los biochar generados mediante pirólisis asistida por microondas (Tabla 4-6) y carbonización hidrotermal (HTC) (Tabla 4-7), lo que permite evaluar la influencia de cada proceso en la acidez o alcalinidad del material obtenido.

Residuo	Ensayo 450 W	Ensayo 600 W	Ensayo 800 W
Cáscara de naranja	5,37	5,44	5,61
Piel de plátano	5,73	5,73	6,68
Posos de café	5,85	5,7	5,7
Piel de patata	7,43	7,42	7,33

Tabla 4-6 pH del biochar: pirólisis asistida por microondas

Los valores de pH obtenidos varían en función del tipo de residuo y la temperatura del proceso. Sin embargo, en términos generales, los biochar analizados se encuentran dentro del rango óptimo de pH (5,5-7) [44]. Sin embargo, el biochar obtenido a partir de la piel de patata mediante pirólisis presenta valores de pH más elevados, oscilando entre 7,33 y 7,43. Este rango sugiere una mayor estabilidad en sus propiedades químicas durante el proceso de pirólisis, manteniendo una composición cercana a la neutralidad o ligeramente alcalina [44], lo que favorece su aplicación en suelos ácidos como enmienda para la corrección del pH.

Por otro lado, la cáscara de naranja y la piel de plátano muestran unos resultados similares, con un rango entre 5,37 y 6,68. Se observa un ligero aumento del pH con temperaturas más elevadas, destacando la piel de plátano a 800 W (pH = 6,68). Este incremento indica una mayor concentración de minerales básicos en el biochar y la eliminación de compuestos volátiles, lo que genera condiciones más alcalinas [45]. No obstante, ambos materiales pueden seguir considerándose ligeramente ácidos.

En cuanto a los posos de café, estos presentan una tendencia relativamente estable con valores de pH entre 5,7-5,85, lo que sugiere que su acidez no se ve afectada por la temperatura del proceso. Esto indica que es un residuo menos susceptible a la modificación térmica en términos de acidez [44], manteniéndose en un rango ácido en todas las condiciones de temperatura.

Se podría decir que, la pirólisis asistida por microondas tiende a conservar un pH relativamente estable en la mayoría de los residuos analizados. La piel de patata es el material que muestra la mayor variación, manteniendo su carácter alcalino, lo que la convierte en una opción adecuada para la mejora de suelos ácidos.

A continuación, se analizará el pH obtenido a través del proceso de carbonización hidrotermal (Tabla 4-7):

Residuo	Ensayo 2 horas	Ensayo 4 horas
Cáscara de naranja	5,64	4,68
Piel de plátano	6,01	5,29
Posos de café	5,64	4,68
Piel de patata	5,15	5,15

Tabla 4-7 pH del biochar: HTC

Los valores de pH obtenidos tras el proceso de carbonización hidrotermal (HTC) muestran una tendencia general a la disminución con el aumento del tiempo de reacción. Esto indica que un mayor tiempo de tratamiento favorece la formación de compuestos ácidos en la estructura del biochar, reduciendo su pH [44]. Sin embargo, la piel de patata representa una excepción a esta tendencia, ya que su pH se mantiene constante en ambos ensayos, lo que sugiere una mayor estabilidad química frente a las condiciones de HTC.

Comparando los valores de pH obtenidos en HTC con los de la pirólisis asistida por microondas, se observa que el biochar producido mediante HTC tiende a ser más ácido. En particular, en los ensayos de 4 horas, la mayoría de los residuos presentan valores de pH por debajo de 5, lo que indica una mayor presencia de ácidos orgánicos o una menor retención de minerales alcalinos en comparación con la pirólisis. Este comportamiento puede explicarse por las diferencias en los mecanismos de degradación térmica y la solubilización de compuestos durante el proceso hidrotermal [44].

En términos de aplicaciones potenciales, el biochar obtenido mediante HTC podría ser más adecuado para suelos que requieran una ligera acidificación, mientras que el producido por pirólisis asistida por microondas podría ser más beneficioso en suelos ácidos que necesiten un aumento del pH.

4.1.4 Porosidad

La porosidad del biochar es un parámetro muy importante en su caracterización, ya que influye directamente en su capacidad de adsorción, retención de agua y nutrientes, así como en su efectividad para aplicaciones ambientales y agrícolas [46]. En este apartado, se analizará primero la porosidad obtenida mediante el proceso de pirólisis asistida por microondas (Tabla 4-8), seguida del análisis correspondiente a la carbonización hidrotermal (HTC) (Tabla 4-9).

Residuo	Porosidad (%)		
	Ensayo 450 W	Ensayo 600 W	Ensayo 800 W
Cáscara de naranja	92,31	68,31	80,95
Piel de plátano	50,00	65,00	60,00
Posos de café	57,14	50,00	61,90
Piel de patata	64,29	56,00	90,91

Tabla 4-8 Porosidad del biochar: pirólisis asistida por microondas

En cuanto a la porosidad del biochar obtenido por pirólisis asistida por microondas, se observan variaciones significativas dependiendo del tipo de residuo y la potencia aplicada. La cáscara de naranja presenta la mayor porosidad a 450 W (92,31 %), lo que sugiere una estructura altamente porosa. Este resultado concuerda con los valores de densidad obtenidos, ya que la cáscara de naranja fue el material menos denso, lo que confirma que su baja densidad se debe a su alta porosidad. En contraste, la piel de patata alcanza su mayor porosidad a 800 W (90,91 %), lo que indica que temperaturas elevadas favorecen la generación de una estructura más abierta en este residuo [19].

Por otro lado, los posos de café y la piel de plátano presentan valores más estables, aunque con ligeras variaciones según la potencia aplicada en el proceso. En general, se aprecia que la potencia influye de manera distinta en cada residuo, modificando la estructura del biochar de acuerdo con su composición química y comportamiento térmico.

A continuación, se presentan los valores de porosidad obtenidos en el biochar producido mediante HTC (Tabla 4-9):

Residuo	Porosidad (%)	
	Ensayo 2 horas	Ensayo 4 horas
Cáscara de naranja	55,56	75,00
Piel de plátano	40,00	54,00
Posos de café	95,65	75,00
Piel de patata	75,00	66,67

Tabla 4-9 Porosidad del biochar: HTC

En el biochar obtenido mediante carbonización hidrotermal (HTC), la porosidad varía en función del tiempo de tratamiento y del tipo de residuo utilizado. En términos generales, se identifican dos tendencias diferenciadas según la naturaleza del material.

Por un lado, en la cáscara de naranja y en la piel de plátano, un mayor tiempo de exposición favorece un incremento en la porosidad, lo que sugiere que la estructura del material sigue modificándose a lo largo del proceso térmico [47].

Por otro lado, los posos de café y la piel de patata muestran una reducción de porosidad con tiempos del proceso más prolongados. Esta disminución podría atribuirse a una reorganización de los compuestos carbonosos, que provoca una mayor compactación de la estructura del biochar [48].

Comparando los dos procesos, se observa que la HTC tiende a generar biochar con menor porosidad en comparación con la pirólisis asistida por microondas, lo que puede estar vinculado a la presencia de

productos líquidos en el proceso hidrotermal que afectan la estructura del material [48]. Estos resultados son relevantes para aplicaciones donde la porosidad es un factor determinante, como en la adsorción de contaminantes o la retención de agua en suelos.

4.1.5 Rendimiento

El rendimiento del biochar es un parámetro fundamental en su producción, ya que permite evaluar la eficiencia del proceso y la cantidad de material sólido recuperado tras la conversión de la biomasa. Comprender cómo varía el rendimiento en función de las condiciones experimentales es necesario para optimizar el proceso.

A continuación, se presentan los valores de rendimiento de biochar obtenidos en los distintos ensayos, diferenciando los resultados según el método empleado. En la Tabla 4-10 se recogen los rendimientos obtenidos mediante pirólisis asistida por microondas.

Residuo	Rendimiento (%)		
	Ensayo 450 W	Ensayo 600 W	Ensayo 800 W
Cáscara de naranja	79,20	73,50	86,27
Piel de plátano	88,97	86,44	79,64
Posos de café	92,70	90,25	94,54
Piel de patata	85,35	74,41	76,70

Tabla 4-10 Rendimiento: pirólisis asistida por microondas

Los datos obtenidos indican que los posos de café son el residuo con mayor rendimiento, manteniéndose en valores superiores al 90 % de manera constante. En este caso, se observa una relación directa entre la potencia aplicada y el rendimiento obtenido, ya que el aumento de la potencia genera una mayor producción de biochar.

Un comportamiento similar se presenta en la cáscara de naranja, donde el mayor rendimiento se alcanza a 800 W. Sin embargo, este residuo experimenta una leve disminución al aumentar la potencia de 450 W a 600 W, siendo esta última la que produce los valores más bajos en comparación con el resto de los residuos analizados. Esto podría ser debido al tiempo de realización del ensayo (50 minutos), que pudo no haber sido suficiente a la potencia de 600 W.

En contraste, los residuos de piel de plátano y piel de patata presentan una tendencia opuesta, mostrando una reducción en el rendimiento a medida que aumenta la potencia aplicada. En el caso de la piel de plátano, se obtienen valores que oscilan entre el 88,97 % y el 79,64 %, lo que indica que este material es menos sensible a los cambios en la potencia.

Por otro lado, la piel de patata muestra una significativa variabilidad entre las potencias estudiadas. A 450 W, el rendimiento es cercano al 85 %, pero al aumentar la potencia a 600 W y 800 W, el rendimiento disminuye hasta un 74 %, por lo que, a mayor potencia, menor cantidad de biochar es capaz de generar.

En general, los resultados reflejan que el impacto de la potencia en el rendimiento del biochar varía según el tipo de residuo. Los posos de café y la cáscara de naranja presentan un mayor rendimiento a potencias más altas, lo que indica una mayor conversión de biomasa en biochar. En contraste, la piel de plátano y la piel de patata muestran una reducción en el rendimiento con el aumento de la potencia, lo que sugiere una menor eficiencia en la conversión de biomasa a biochar bajo estas condiciones.

A continuación, se analizará el rendimiento de biochar obtenido en los ensayos de carbonización hidrotermal en autoclave (véase en Tabla 4-11):

Residuo	Rendimiento (%)	
	Ensayo 2 horas	Ensayo 4 horas
Cáscara de naranja	66,89	67,44
Piel de plátano	66,67	60,72
Posos de café	96,82	93,75
Piel de patata	91,55	70,16

Tabla 4-11 Rendimiento: HTC

Los resultados obtenidos mediante carbonización hidrotermal indican que los posos de café presentan el mayor rendimiento, manteniéndose por encima del 90 % en ambos tiempos de ensayo. Esto sugiere que este residuo conserva una elevada proporción de material sólido tras el proceso, lo que podría atribuirse a una menor degradación térmica y una mayor estabilidad estructural bajo estas condiciones [31].

En el caso de la cáscara de naranja, se observa una variación mínima entre los ensayos de 2 y 4 horas, lo que indica que el tiempo de reacción no influye significativamente en su rendimiento.

Por otro lado, tanto la piel de plátano como la piel de patata experimentan una reducción en el rendimiento a medida que aumenta el tiempo del proceso. En particular, la piel de patata muestra la mayor disminución, con una diferencia cercana al 20 % entre los ensayos de 2 y 4 horas. Este comportamiento podría estar relacionado con una mayor descomposición de compuestos orgánicos o con una mayor conversión del material sólido en fase líquida y gaseosa a medida que se prolonga la carbonización [31].

Estos resultados sugieren que la selección del tiempo de operación en el proceso de carbonización hidrotermal debe considerarse cuidadosamente según el tipo de residuo, ya que algunos materiales mantienen una estabilidad notable mientras que otros experimentan una reducción significativa en su rendimiento con tiempos de reacción prolongados.

4.1.6 Análisis inmediato

El análisis inmediato permite caracterizar la composición química del biochar, proporcionando información sobre su contenido en material volátil, carbono fijo y cenizas. Estos parámetros son fundamentales para determinar su estabilidad térmica, su potencial aplicación como enmienda de suelos o su capacidad adsorbente en procesos ambientales. Un mayor porcentaje de carbono fijo (CF) indica mayor estabilidad estructural y durabilidad, mientras que un alto contenido de volátiles puede sugerir una mayor reactividad y un potencial energético significativo [49]. Además, el contenido de cenizas refleja la cantidad de minerales presentes, lo que puede influir en la aplicabilidad del biochar en suelos y otros usos industriales [50].

La Tabla 4-12, Tabla 4-13 y Tabla 4-14 presentan los resultados obtenidos para los residuos originales y los biochar producidos mediante pirólisis asistida por microondas y carbonización hidrotermal (HTC), respectivamente. A partir de estos datos, se analizan las diferencias entre los materiales y la influencia del método de conversión en sus propiedades finales.

Residuo	Volátiles (%)	CF (%)	Cenizas (%)
Cáscara de naranja	78,34	18,26	2,19
Piel de plátano	73,52	6,93	19,54
Posos de café	86,13	12,41	1,46
Piel de patata	76,55	11,72	11,73

Tabla 4-12 Análisis inmediato de los residuos

Biochar	Volátiles (%)			CF (%)			Cenizas (%)		
Potencia del ensayo	450 W	600 W	800 W	450 W	600 W	800 W	450 W	600 W	800 W
Cáscara de naranja	76,32	65,69	71,29	19,93	28,73	27,91	3,75	5,58	0,80
Piel de plátano	50,08	53,71	55,98	24,34	25,96	27,40	19,67	20,33	22,52
Posos de café	91,60	87,79	79,17	6,82	10,74	18,29	1,57	1,47	2,54
Piel de patata	76,39	75,65	75,33	16,12	17,76	17,68	7,49	6,59	6,99

Tabla 4-13 Análisis inmediato del biochar: pirólisis asistida por microondas

El análisis inmediato de los residuos y del biochar obtenido mediante pirólisis asistida por microondas muestra variaciones significativas en la composición de los materiales en función de las condiciones del proceso.

En cuanto a la masa volátil, los residuos originales presentan un elevado contenido, destacando los posos de café con un valor de 86,13 %. Tras los ensayos de pirólisis, se aprecia una reducción generalizada de la masa volátil en 3 de los 4 materiales estudiados, lo que indica la progresiva transformación del material en carbono fijo y cenizas. La cáscara de naranja muestra una tendencia decreciente en la cantidad de volátiles cuando se aumenta la potencia aplicada de 450 W a 600 W, sugiriendo una mayor eliminación de compuestos orgánicos. Sin embargo, en el caso de la piel de plátano, su masa volátil aumenta con un incremento de potencia. En contraste, la piel de patata se mantiene estable durante la aplicación de diferentes potencias.

En relación con el carbono fijo, todos los residuos experimentan un aumento de carbono tras el proceso pirólisis a excepción de los posos de café. La piel de plátano es el residuo que muestra un cambio más notable, pasando de valores cercanos al 7 % en su estado original a valores entre el 24,34 % y el 27,40 % en el biochar. Este resultado indica que la pirólisis favorece su conversión en un material más carbonoso, especialmente a 800 W, donde alcanza su mayor rendimiento de carbono fijo. De manera similar ocurre con la cáscara de naranja, aunque en este caso el nivel más alto de carbono fijo se obtiene a 600 W (28,73 %), lo que sugiere que esta potencia es óptima para su carbonización.

Por otro lado, los posos de café presentan una tendencia distinta. Inicialmente, se observa una reducción en el carbono fijo a 450 W y 600 W, lo que indica una posible degradación de estructuras carbonosas inestables. Sin embargo, a 800 W, el biochar obtenido muestra un ligero aumento en su contenido de carbono fijo.

En el caso de la piel de patata, el incremento del carbono fijo es más moderado en comparación con la piel de plátano y la cáscara de naranja, mostrando estabilidad en las potencias más elevadas y sugiriendo que el proceso de carbonización tiene un menor impacto en este material en términos de enriquecimiento en carbono.

El contenido de cenizas refleja la cantidad de material inorgánico presente en el biochar tras la pirólisis. Algunos estudios indican que, al aumentar la potencia o el tiempo de pirólisis, el contenido de cenizas tiende a incrementarse debido a la mayor degradación de la materia orgánica y la concentración relativa de los compuestos minerales [32]. En este sentido, la piel de plátano, que presenta un alto contenido de cenizas en su estado original (19,54 %), alcanza valores de hasta 22,52 % a 800 W, lo que sugiere que el proceso de carbonización favorece la acumulación de fracción inorgánica en el biochar.

En términos generales, el aumento de la potencia de pirólisis conduce a una mayor conversión de materia volátil en carbono fijo, especialmente en residuos como la piel de plátano y la cáscara de naranja. Sin embargo, en materiales como los posos de café y la piel de patata, la variabilidad es menos pronunciada, lo que sugiere que el tipo de biomasa influye en la efectividad del proceso de carbonización. Además, el contenido de cenizas tiende a aumentar en algunos residuos, lo que puede impactar en su aplicación final en suelos o filtros.

Estos resultados reflejan la importancia de seleccionar la potencia de pirólisis óptima según el tipo de residuo y el objetivo de aplicación del biochar.

Por otro lado, el análisis inmediato del biochar obtenido mediante carbonización hidrotermal (Tabla 4-14) en comparación con los residuos originales (Tabla 4-12), permite identificar cambios significativos en su composición química, reflejando la transformación térmica sufrida durante el proceso.

Biochar	Volátiles (%)		CF (%)		Cenizas (%)	
Tiempo del ensayo	2 horas	4 horas	2 horas	4 horas	2 horas	4 horas
Cáscara de naranja	69,37	68,23	26,73	28,13	3,89	3,65
Piel de plátano	61,18	60,45	28,10	20,01	10,72	19,54
Posos de café	83,91	82,91	15,45	16,47	0,64	0,62
Piel de patata	80,02	79,66	12,22	10,93	7,76	9,41

Tabla 4-14 Análisis inmediato del biochar: HTC

En cuanto a la materia volátil, se observa una reducción moderada en 3 de los 4 residuos estudiados. Sin embargo, en términos de tiempo del proceso, todos experimentan una leve reducción, pero manteniendo porcentajes similares, por lo que el tiempo prácticamente no influye en la variación de la masa volátil.

En términos de carbono fijo, se observa una variabilidad significativa según el residuo tratado. La cáscara de naranja experimenta un incremento considerable, pasando de un 18,26 % en el residuo original a valores entre 26,73 % y 28,13 % en el biochar, lo que indica una mayor estabilidad en la estructura carbonosa del material. Un caso similar se presenta en la piel de plátano, aunque con una tendencia inversa, ya que su contenido de carbono fijo disminuye con un mayor tiempo de tratamiento, pasando de 28,10 % a 20,01 %. Este comportamiento sugiere una posible degradación de compuestos carbonosos a tiempos prolongados de reacción. Los posos de café y la piel de patata, en cambio, presentan cambios menos pronunciados, con valores de carbono fijo relativamente estables después de la carbonización.

En lo que respecta a la cantidad de cenizas, se evidencia un aumento en la mitad de los residuos después del tratamiento térmico, reflejando la concentración de materiales inorgánicos tras la eliminación de materia volátil y compuestos orgánicos. La piel de plátano muestra el incremento más significativo, pasando a un valor de 19,54 % en el biochar después de 4 horas de tratamiento en comparación con el 6,93 % en el residuo original, lo que indica una mayor retención de material mineral en este proceso. Por otro lado, los posos de café presentan valores de cenizas prácticamente invariables a los dos tiempos estudiados, lo que reafirma la estabilidad de este material a lo largo del proceso de HTC.

En general, los resultados obtenidos reflejan que la carbonización hidrotermal modifica la composición de los residuos de manera diferenciada según el tipo de material y el tiempo de tratamiento. Mientras que algunos residuos experimentan una mejora en la concentración de carbono fijo, otros muestran una mayor retención de cenizas o una reducción moderada de la materia volátil, lo que sugiere que la optimización del proceso debe ajustarse a las características específicas de cada residuo para maximizar la calidad del biochar obtenido.

4.1.7 Análisis elemental y poder calorífico

En este apartado se presentan los resultados del análisis elemental de los residuos originales y biochar obtenidos por los dos métodos de tratamiento, así como su poder calorífico.

En primer lugar, se presentan los resultados de los residuos iniciales (Tabla 4-15) y, posteriormente, se analiza la composición del biochar obtenido a través de la pirólisis asistida por microondas (Tabla 4-16):

	Cáscara de naranja	Piel de plátano	Posos de café	Piel de patata
N (%)	2,15	2,21	3,10	2,56
C (%)	37,03	38,80	48,38	36,58
H (%)	6,30	6,08	7,92	6,29
S (%)	0,30	0,30	0,30	0,30
O (%)	54,21	52,59	40,28	54,27
PCS (kcal/kg)	2843,10	2980,45	4918,72	2800,63

Tabla 4-15 Análisis elemental y PCS: residuos originales

	Potencia	Cáscara de naranja	Piel de plátano	Posos de café	Piel de patata
N (%)	450 W	1,81	1,56	2,32	1,54
	600 W	1,79	1,81	2,44	1,59
	800 W	1,94	1,60	2,43	1,51
C (%)	450 W	50,36	42,02	50,90	43,45
	600 W	47,08	44,49	52,85	44,46
	800 W	50,36	42,18	53,25	43,70
H (%)	450 W	5,27	4,55	6,74	5,78
	600 W	5,31	4,62	6,74	5,71
	800 W	5,50	4,92	6,68	5,62
S (%)	450 W	0,30	0,30	0,30	0,30
	600 W	0,30	0,30	0,30	0,30
	800 W	0,30	0,30	0,30	0,30
O (%)	450 W	42,26	51,57	39,74	48,92
	600 W	45,51	48,78	37,67	47,95
	800 W	41,91	51,00	37,35	48,86
PCS (kcal/kg)	450 W	4081,82	2759,12	4738,85	3412,53
	600 W	3691,70	3102,80	4986,74	3510,17
	800 W	4176,09	2923,60	5011,94	3380,87

Tabla 4-16 Análisis elemental y PCS: pirólisis asistida por microondas

Tras el proceso de pirólisis asistida por microondas, se observa un aumento en el contenido de carbono del biochar en comparación con los residuos originales. Destaca la cáscara de naranja, que experimenta un incremento de carbono del 10-13 %, mientras que el resto de los residuos presentan aumentos inferiores al 10 %. Este fenómeno se debe a la eliminación de material volátil y la concentración de carbono estructural, ya que la pirólisis, al ser un proceso de degradación térmica en ausencia de oxígeno, favorece la eliminación de hidrógeno y oxígeno en forma de compuestos volátiles, promoviendo la retención de carbono en la fase sólida [29].

El contenido de hidrógeno se mantiene relativamente estable en todos los biochar, mientras que el oxígeno tiende a disminuir, lo que indica una mayor conversión del material hacia estructuras carbonizadas más estables. La reducción de oxígeno es un indicativo de la eliminación de grupos funcionales oxigenados, lo que contribuye a la mejora en la estabilidad térmica del biochar [29].

En términos de poder calorífico, los posos de café presentan valores más altos (> 4700 kcal/kg), lo que los convierte en el residuo más adecuado para aplicaciones energéticas debido a su alto contenido de carbono fijo y baja proporción de oxígeno [51]. En contraste, la piel de plátano y la piel de patata

muestran valores más bajos (alrededor de 3000-3500 kcal/kg), lo que limita su eficiencia como biocombustible. La cáscara de naranja, con valores intermedios (3700-4200 kcal/kg), podría tener cierto potencial energético, aunque menor que los posos de café. Estos resultados reflejan que el poder calorífico está directamente influenciado por la composición química del biochar, siendo los residuos con mayor contenido en carbono los más eficientes para la combustión [52].

Los resultados obtenidos confirman que la pirólisis asistida por microondas podría ser una técnica eficiente para la producción de biochar con alto contenido de carbono y alto poder calorífico, lo que lo hace viable para diversas aplicaciones, incluyendo su uso como enmienda de suelos, adsorbente de contaminantes y biocombustible.

A continuación, se analizan los biochar obtenidos mediante el proceso de carbonización hidrotermal (HTC) mediante autoclave (Tabla 4-17):

	Tiempo	Cáscara de naranja	Piel de plátano	Posos de café	Piel de patata
N (%)	2 h	1,01	1,56	2,26	1,51
	4 h	1,00	1,44	2,25	1,38
C (%)	2 h	44,81	43,41	51,27	40,04
	4 h	46,40	46,75	50,92	39,54
H (%)	2 h	6,09	5,29	7,07	5,82
	4 h	5,99	5,20	7,03	5,81
S (%)	2 h	0,30	0,30	0,30	0,30
	4 h	0,30	0,30	0,30	0,30
O (%)	2 h	47,79	49,45	39,10	52,33
	4 h	46,31	46,31	39,50	52,98
PCS (kcal/kg)	2 h	3676,27	3215,48	4911,16	3002,92
	4 h	3835,94	3592,47	4850,71	2929,64

Tabla 4-17 Análisis elemental: HTC con autoclave

El proceso de carbonización hidrotermal genera un incremento en el contenido de carbono del biochar respecto a los residuos originales. Los posos de café destacan con valores superiores al 50 % en ambas condiciones de reacción. La cáscara de naranja y la piel de plátano muestran un incremento notable en su contenido de carbono con respecto al residuo inicial, aunque sin alcanzar el umbral del 50 %, mientras que la piel de patata presenta los valores más bajos, situándose en torno al 40 %.

Este comportamiento responde a la eliminación de compuestos volátiles y la concentración progresiva de carbono a medida que avanza el proceso. Además, se observa una reducción del oxígeno en los biochar obtenidos, lo que sugiere una mejora en la estabilidad química del material [29].

En cuanto al poder calorífico, los posos de café vuelven a destacar con valores próximos a 4900 kcal/kg, estableciéndose como el residuo con mayor potencial energético [52]. La cáscara de naranja y la piel de plátano alcanzan valores intermedios (3600-3800 kcal/kg), mientras que la piel de patata muestra el menor poder calorífico (~3000 kcal/kg). Esto sugiere que, aunque todos los biochar obtenidos por HTC tienen cierta viabilidad como biocombustible, los posos de café resultan ser la opción más adecuada.

Estos resultados reflejan que la carbonización hidrotermal es una alternativa viable para la producción de biochar con un contenido de carbono significativo y características adecuadas para distintas aplicaciones. No obstante, el tipo de residuo y las condiciones del proceso siguen siendo determinantes en la calidad final del producto.

Tras el análisis elemental del biochar obtenido por pirólisis asistida por microondas y carbonización hidrotermal (HTC), se ha observado un aumento en el contenido de carbono en comparación con los residuos iniciales, acompañado de una reducción de oxígeno y de hidrógeno. Para profundizar en esta evolución y determinar el grado de carbonización de cada biochar, es útil analizar los ratios atómicos O/C y H/C, que permiten comparar su composición con otros materiales carbonosos.

El diagrama de Van Krevelen [53] es una herramienta útil para analizar la composición y evolución de materiales carbonosos, incluyendo la biomasa y el biochar. Este gráfico representa las relaciones atómicas de hidrógeno a carbono (H/C) y oxígeno a carbono (O/C), situando materiales como biomasa, turba, lignito y carbón en posiciones específicas que reflejan su grado de carbonización. Valores elevados de O/C y H/C indican una menor carbonización, mientras que valores reducidos sugieren una mayor estabilidad estructural y resistencia a la degradación.

Dependiendo de la dirección en la que se desplace el biochar en el diagrama, es posible inferir procesos como descarbonización, deshidratación o desmetanización [54] (Figura 4-1).

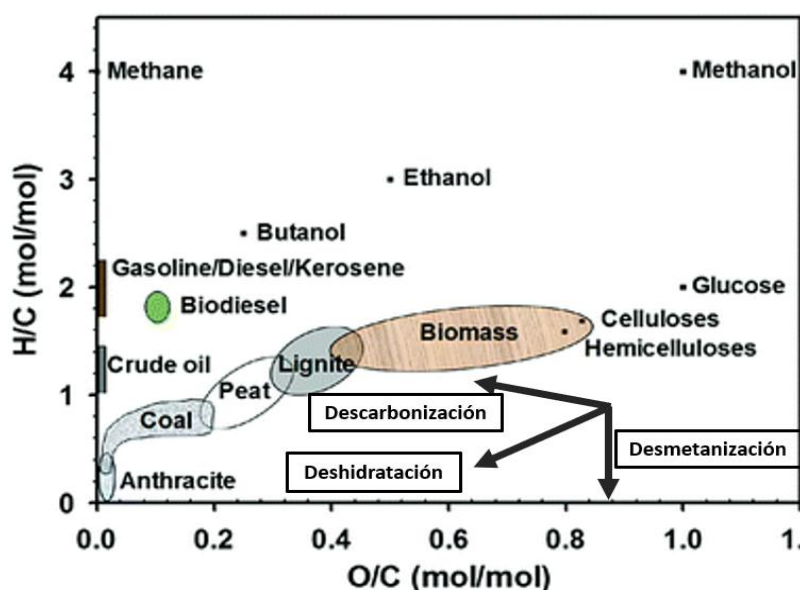


Figura 4-1 Diagrama de Van Krevelen [55]

A continuación, se muestran los ratios de los biochar obtenidos mediante pirólisis asistida por microondas (Figura 4-2):

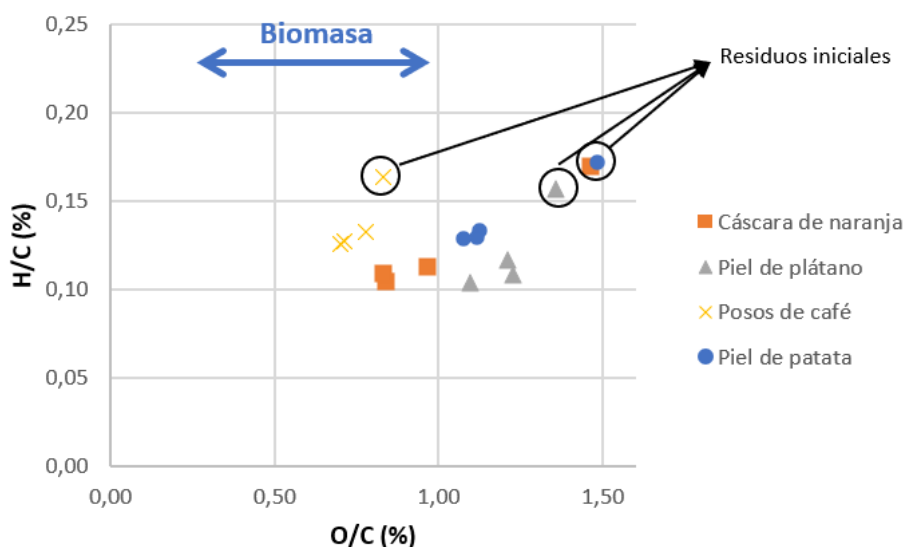


Figura 4-2 Diagrama de Van Krevelen: pirólisis asistida por microondas

Tras la pirólisis, se evidencia que todos los residuos experimentan procesos de deshidratación y desmetanización; en este contexto, tanto los posos de café como la cáscara de naranja adquieren propiedades que les permiten equipararse a biomasa. Esto justifica su potencial uso como combustibles, ya que son los que presentan un mayor poder calorífico, como se ha señalado anteriormente. Por otro lado, los demás residuos muestran un bajo contenido de carbono fijo, lo que se refleja en el diagrama al no ubicarse en la zona correspondiente a la biomasa.

Este comportamiento concuerda con diversos estudios que indican que, tras el tratamiento de la biomasa para su conversión en biochar, esta experimenta principalmente una deshidratación seguida de una desmetanización [56]. En particular, el estudio mencionado muestra que los residuos tratados se desplazan en la gráfica hacia regiones correspondientes a materiales como el lignito o la turba, caracterizados por un menor contenido de oxígeno e hidrógeno. Esta transformación los hace más adecuados para su uso como biocombustible, un comportamiento similar al observado en los biochar obtenidos en este trabajo.

Con respecto a la carbonización hidrotermal con autoclave, en la Figura 4-3 se presentan los resultados obtenidos:

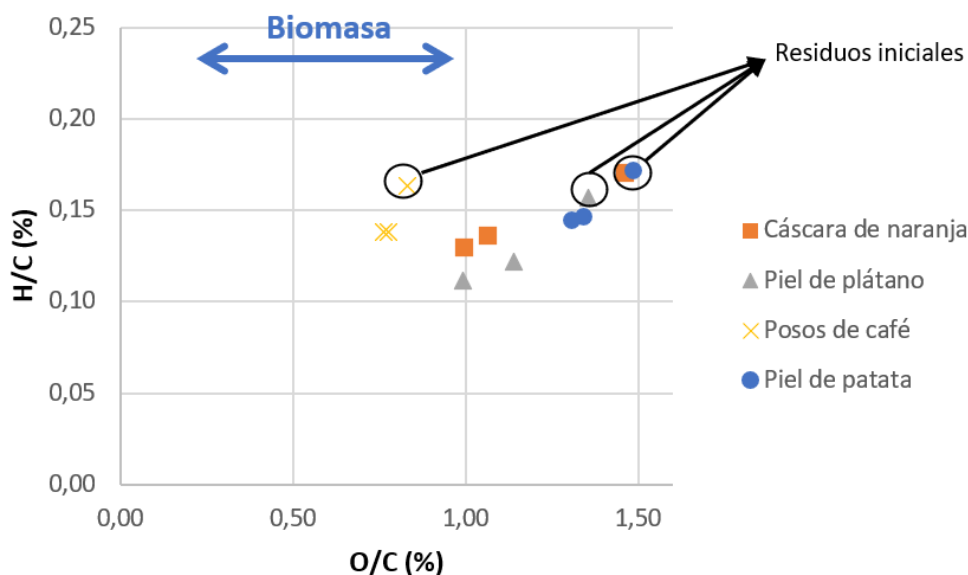


Figura 4-3 Van Krevelen: HTC con autoclave

Tras el proceso de carbonización hidrotermal, los residuos que presentan un mayor desplazamiento en el diagrama de Van Krevelen son la cáscara de naranja, la piel de plátano y los posos de café. Sin embargo, son la cáscara de naranja y los posos de café los que mantienen una mayor similitud con la biomasa tras el tratamiento, lo que confirma su potencial como biocombustibles sólidos. Aun así, el biochar obtenido a partir de los posos de café es el que presenta los resultados más favorables.

Por otro lado, la piel de plátano experimenta la mayor deshidratación tras 4 horas de carbonización hidrotermal, lo que sugiere que tiempos de reacción más prolongados intensifican este efecto. Esto se refleja en los valores de poder calorífico, donde tanto la piel de plátano como la piel de patata muestran valores más bajos en comparación con los demás materiales analizados, reafirmando su menor estabilidad térmica.

4.1.1 Eficiencia energética

En este apartado se calculará la eficiencia energética para medir la efectividad de ambos procesos en convertir la biomasa en un material con alto contenido energético.

Se calcula multiplicando el poder calorífico del biochar por el rendimiento y a continuación, dividiéndolo por el poder calorífico del residuo inicial:

$$\text{Eficiencia Energética} = \frac{PC \text{ final} \times \text{Rendimiento}}{PC \text{ inicial}} \quad \text{Ecuación 4-1}$$

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de las eficiencias tanto del método de pirólisis asistida por microondas como de carbonización hidrotermal:

Residuo	Pirólisis asistida por microondas			Carbonización hidrotermal	
	450 W	600 W	800 W	2 horas	4 horas
Cáscara de naranja	113,71	95,44	126,71	86,49	91,00
Piel de plátano	82,37	89,98	82,91	71,93	73,19
Posos de café	89,31	91,50	95,85	96,67	92,46
Piel de patata	104,00	93,26	96,13	98,16	73,39

Tabla 4-18 Eficiencias: pirólisis y HTC

Como se observa en la Tabla 4-18, la eficiencia energética varía en función del método de producción del biochar.

En el caso de la pirólisis asistida por microondas, se destacan valores de eficiencia superiores al 100% en algunos residuos, como la cáscara de naranja a 450 W y 800 W y la piel de patata a 450 W. Este resultado sugiere que, en estos casos, el producto final presenta un mayor poder calorífico en relación con la energía contenida en la biomasa original y por lo tanto puede indicar que el proceso genera más energía de la que consume [56]. Sin embargo, a 600 W, la eficiencia de los 2 residuos mencionados disminuye, lo que podría estar relacionado con una menor optimización del proceso en esta potencia. En general, los valores más elevados se encuentran en la cáscara de naranja y la piel de patata, mientras que la piel de plátano y los posos de café presentan valores más estables y moderados.

Por otro lado, en HTC, los valores de eficiencia son más homogéneos y se mantienen por debajo del 100 %. Los posos de café y la piel de patata presentan las mayores eficiencias, destacando la piel de patata a 2 horas con un 98,16 %. En contraste, la piel de plátano presenta los valores más bajos, lo que indica que este método no es el más eficiente para este residuo en términos de aprovechamiento energético.

Comparando ambos métodos, la pirólisis asistida por microondas tiende a presentar valores de eficiencia más elevados, especialmente en ciertos residuos y a potencias específicas como 450 W y 800 W. Esto sugiere que, para algunos materiales, este método permite una mayor retención energética en el biochar final. Sin embargo, HTC ofrece valores más estables y homogéneos, lo que podría ser beneficioso para aplicaciones donde se busca consistencia en la calidad del biochar.

4.2 Análisis estadísticos de varianza

Para evaluar el impacto de factores como la potencia y el tipo de residuo en las distintas mediciones de los procesos de carbonización hidrotermal y pirólisis asistida por microondas, se realizó un análisis estadístico. Este análisis incluyó una prueba de hipótesis y un análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de significancia del 5 %, con el fin de determinar la influencia de estas variables en los resultados obtenidos. Las hipótesis formuladas para estos experimentos son las siguientes:

- H_0 : No existe un efecto significativo de la potencia o tiempo y el tipo de residuo utilizado en el ensayo de carbonización hidrotermal sobre la propiedad analizada.
- H_a : Sí existe un efecto significativo de la potencia o tiempo y el tipo de residuo utilizado en el ensayo de carbonización hidrotermal sobre la propiedad analizada.

4.2.1 Densidad

En la Tabla 4-19 se muestran las densidades obtenidas tras los ensayos de pirólisis asistida por microondas mientras que en la Tabla 4-20 se presenta el análisis de varianza correspondiente.

Residuo	Ensayo 450 W	Ensayo 600 W	Ensayo 800 W
Cáscara de naranja	0,24	0,26	0,23
Piel de plátano	0,36	0,36	0,31
Posos de café	0,27	0,28	0,41
Piel de patata	0,41	0,41	0,50

Tabla 4-19 Densidad: pirólisis asistida por microondas (g/mL)

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Potencia	0,059	3	0,0197	7,644	0,017	4,757
Residuo	0,004	2	0,002	0,798	0,492	5,143
Error	0,015	6	0,003			
Total	0,079	11				

Tabla 4-20 ANOVA densidad: pirólisis asistida por microondas

Como se puede observar en la Tabla 4-20, el factor de probabilidad que evalúa el nivel de significancia de la potencia es de 0,017. Dado que este valor es menor que 0,05, se puede rechazar la hipótesis nula, lo que indica que la potencia utilizada en la pirólisis asistida por microondas tiene un efecto significativo en la densidad del biochar obtenido.

Por otro lado, el factor de probabilidad correspondiente al tipo de residuo es de 0,492, mucho mayor de 0,05 y no se puede descartar la hipótesis nula. Por lo tanto, se concluye que el tipo de residuo no tiene un efecto significativo en la densidad del biochar.

Desde un punto de vista teórico, la densidad del biochar puede estar influenciada por la estructura interna del material de origen y por las condiciones del proceso de pirólisis. En este caso, se observa que la potencia aplicada tiene un papel importante en la formación de biochar [32], posiblemente debido a la mayor conversión de materia orgánica y la reducción del volumen del material a medida que incrementa la potencia.

A continuación, en la Tabla 4-21 se muestran los resultados de las densidades obtenidas tras el proceso de HTC:

Residuo	Ensayo 2 h	Ensayo 4 h
Cáscara de naranja	0,80	0,99
Piel de plátano	0,32	0,33
Posos de café	0,32	0,51
Piel de patata	0,74	0,76

Tabla 4-21 Densidad: HTC (g/mL)

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Tiempo	0,437	3	0,146	28,438	0,011	9,277
Residuo	0,021	1	0,021	4,090	0,136	10,128
Error	0,015	3	0,005			
Total	0,474	7				

Tabla 4-22 ANOVA densidad: HTC

Como se puede observar en la Tabla 4-22, el factor de probabilidad que evalúa el nivel de significancia del tiempo del proceso en el biochar es de 0,011. Dado que este valor es menor que 0,05, se rechaza la hipótesis nula, lo que indica que el tiempo del proceso tiene un efecto significativo en la densidad del biochar obtenido mediante HTC.

Por otro lado, el factor de probabilidad correspondiente al tipo de residuo es de 0,136, lo que es mayor de 0,05. Esto significa que el tipo de residuo no tiene un efecto significativo en la densidad del biochar, por lo tanto, la densidad no varía de manera notable entre residuos bajo las mismas condiciones de HTC.

Desde un punto de vista teórico, la densidad del biochar puede estar influenciada por la reestructuración de la materia orgánica durante el proceso de carbonización hidrotérmica [47]. En este caso, se observa que el tiempo de reacción juega un papel importante, lo que indica que tiempos de carbonización más largos favorecen cambios estructurales en el material, posiblemente debido a una mayor compactación del biochar o a una mayor eliminación de componentes volátiles.

4.2.1 Porosidad

En la Tabla 4-23 se muestran los resultados de porosidad obtenidos mediante los ensayos de pirólisis asistida por microondas:

Residuo	Ensayo 450 W	Ensayo 600 W	Ensayo 800 W
Cáscara de naranja	92,31	68,31	80,95
Piel de plátano	50,00	65,00	60,00
Posos de café	57,14	50,00	61,90
Piel de patata	64,29	56,00	90,91

Tabla 4-23 Porosidad: pirólisis asistida por microondas (%)

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Potencia	1144,650	3	381,550	2,973	0,119	4,757
Residuos	371,987	2	185,993	1,449	0,307	5,143
Error	770,06	6	128,34			
Total	2286,70	11				

Tabla 4-24 ANOVA porosidad: pirólisis asistida por microondas

Como se puede observar en la Tabla 4-24, el factor probabilidad que evalúa el nivel de significancia de la potencia aplicada en el biochar es de 0,119. Dado que este valor es mayor que 0,05, no se puede rechazar la hipótesis nula, lo que indica que la potencia utilizada en el proceso de pirólisis no tiene un efecto significativo en la porosidad del biochar.

Lo mismo sucede con el factor de probabilidad asociado al tipo de residuo. Al superar el valor de 0,05, se concluye que, independientemente del material empleado, la porosidad no presenta variaciones significativas entre los residuos bajo las mismas condiciones de pirólisis.

Desde un punto de vista teórico, la porosidad del biochar está influenciada por la degradación térmica de la materia orgánica y la liberación de compuestos volátiles durante el proceso [57]. En este caso, se observa que ni la potencia aplicada ni el tipo de residuo influyen de una manera significativa en la formación de la estructura porosa del biochar. Esto puede deberse a que en los ensayos conducidos en el microondas, los tiempo de exposición se variaron en función de la potencia aplicada lo que pudo llevar a una optimización previa del proceso.

A continuación, en la Tabla 4-25 se muestran los resultados de la porosidad obtenida tras el proceso de HTC:

Residuo	Ensayo 2 h	Ensayo 4 h
Cáscara de naranja	55,56	75
Piel de plátano	40	54
Posos de café	95,65	75
Piel de patata	75	66,67

Tabla 4-25 Porosidad obtenida mediante HTC (%)

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Tiempo	1513,113	3	504,371	2,852	0,206	9,277
Residuos	2,317	1	2,317	0,013	0,916	10,128
Error	530,563	3	176,854			
Total	2045,992	7				

Tabla 4-26 ANOVA porosidad: HTC

Como se puede observar en la Tabla 4-26, el factor de probabilidad que evalúa el nivel de significancia del tiempo del proceso en la porosidad del biochar es de 0,206. Dado que es mayor de 0,05, no se puede rechazar la hipótesis nula, lo que indica que el tiempo de carbonización no tiene un efecto significativo en la porosidad del biochar obtenido mediante HTC.

Los mismo sucede con el factor de probabilidad asociado al tipo de residuo. Al superar el valor de 0,05, se concluye que, independientemente del material empleado bajo las mismas condiciones de HTC.

Desde un punto de vista teórico, la porosidad del biochar está influenciada por la estructura del material de origen y las condiciones del proceso [47]. En este caso, se observa que ni el tiempo de reacción ni el tipo de residuo influyen de manera significativa en la formación de la estructura porosa del biochar.

4.2.2 Rendimiento

En la Tabla 4-27 se muestran los datos del rendimiento obtenido mediante los ensayos de pirólisis asistida por microondas:

Residuo	Ensayo 450 W	Ensayo 600 W	Ensayo 800 W
Cáscara de naranja	79,20	73,50	86,27
Piel de plátano	88,97	86,44	79,64
Posos de café	92,70	90,25	94,54
Piel de patata	85,35	74,41	76,70

Tabla 4-27 Rendimiento: pirólisis asistida por microondas (%)

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Potencia	356,90	3	118,97	4,91	0,05	4,76
Residuos	59,02	2	29,51	1,22	0,36	5,14
Error	145,25	6	24,21			
Total	561,1720179	11				

Tabla 4-28 ANOVA rendimiento: pirólisis asistida por microondas

Como se puede observar en la Tabla 4-28, el factor de probabilidad que evalúa el nivel de significancia de la potencia aplicada en el proceso para obtener el rendimiento del biochar es de 0,05. Dado que este valor es igual al umbral de significancia del 5 %, se encuentra en el límite de rechazar la hipótesis nula, lo que indica que la potencia utilizada en la pirólisis tiene un efecto parcialmente significativo en el rendimiento del biochar.

Por otro lado, el factor de probabilidad correspondiente al tipo de residuo es de 0,29, lo que es mayor que 0,05. Esto indica que el tipo de residuo no tiene un efecto relevante en el rendimiento del biochar

Desde un punto de vista teórico, el rendimiento del biochar en la pirólisis asistida por microondas puede estar influenciado por la degradación térmica del material y la eliminación de compuestos volátiles durante el proceso [32]. En este caso, la potencia aplicada contribuye a la cantidad de biochar producido.

A continuación, en la Tabla 4-29 se muestran los resultados de los rendimientos obtenidos tras el proceso de HTC:

Residuo	Ensayo 2 h	Ensayo 4 h
Cáscara de naranja	66,89	67,44
Piel de plátano	66,67	60,72
Posos de café	96,82	93,75
Piel de patata	91,55	70,16

Tabla 4-29 Rendimiento: HTC (%)

ANÁLISIS DE
VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Tiempo	1245,523	3	415,174	8,902	0,053	9,277
Residuos	111,355	1	111,355	2,388	0,220	10,128
Error	139,915	3	46,638			
Total	1496,793	7				

Tabla 4-30 ANOVA rendimiento: HTC

Como se puede observar en la Tabla 4-30, el factor de probabilidad que evalúa la significancia del tiempo de reacción en el rendimiento del biochar es de 0,053. Este valor se encuentra próximo al 0,05, por lo que se puede decir que tiene una influencia parcial en el rendimiento, aunque podría considerarse no concluyente.

Por otro lado, el factor de probabilidad correspondiente al tipo de residuo es de 0,220, lo que es mayor que 0,05. Esto indica que el tipo de residuo no tiene un efecto significativo en el rendimiento del biochar.

Desde un punto de vista teórico, el rendimiento del biochar en la carbonización hidrotermal depende en gran medida de la degradación de la biomasa en fase acuosa y de la conversión de la materia orgánica en material carbonoso [47].

4.2.3 Carbono fijo

En la Tabla 4-31 se muestran los resultados de carbono fijo obtenidos mediante los ensayos de pirólisis asistida por microondas:

Biochar	450 W	600 W	800 W
Cáscara de naranja	19,93	28,73	27,91
Piel de plátano	24,34	25,96	27,40
Posos de café	6,82	10,74	18,29
Piel de patata	17,68	17,76	16,12

Tabla 4-31 Carbono fijo: pirólisis asistida por microondas (%)

ANÁLISIS DE
VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Potencia	413,758	3	137,919	12,901	0,005	4,757
Residuos	57,480	2	28,740	2,688	0,147	5,143
Error	64,14	6	10,69			
Total	535,38	11				

Tabla 4-32 ANOVA carbono fijo: pirólisis asistida por microondas

Como se puede observar en la Tabla 4-32, el factor de probabilidad que evalúa el nivel de significancia de la potencia aplicada en el contenido de carbono fijo del biochar es de 0,005. Dado que este valor es menor que 0,05, se rechaza la hipótesis nula, lo que indica que la potencia utilizada en la pirólisis asistida por microondas influye notablemente en el contenido de carbono fijo del biochar obtenido.

Por otro lado, el factor de probabilidad correspondiente al tipo de residuo es de 0,147, lo cual es superior a 0,05: Esto significa que el tipo de residuo no afecta al contenido de carbono fijo del biochar.

Desde un punto de vista teórico, el contenido de carbono fijo en el biochar depende de la degradación térmica de la biomasa y la estabilidad de sus compuestos carbonosos [32]. En este caso, se observa que la potencia aplicada influye en la cantidad de carbono fijo retenido, lo que sugiere que un aumento de energía suministrada favorece la conversión de la biomasa en carbono estructural estable [32]. Sin embargo, el hecho de que el residuo no tenga un impacto notable, indica que el carbono fijo sigue un patrón similar bajo las mismas condiciones de pirólisis.

A continuación, en la Tabla 4-33 se muestran los resultados de los carbonos fijos obtenidos tras el proceso de HTC:

Biochar	2 horas	4 horas
Cáscara de naranja	26,73	28,13
Piel de plátano	28,10	20,01
Posos de café	15,45	16,47
Piel de patata	12,22	10,93

Tabla 4-33 Carbono fijo obtenido mediante HTC (%)

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Tiempo	317,535	3	105,845	10,957	0,040	9,277
Residuos	6,076	1	6,076	0,629	0,486	10,128
Error	28,979	3	9,660			
Total	352,59	7				

Tabla 4-34 ANOVA carbono fijo: HTC

Como se puede observar en la Tabla 4-34, el factor de probabilidad que evalúa el nivel de significancia del tiempo de reacción en el contenido de carbono fijo del biochar es de 0,040. Dado que este valor es menor que 0,05, se rechaza la hipótesis nula, lo que indica que el tiempo de carbonización influye significativamente en el contenido de carbono del biochar.

Por otro lado, el factor de probabilidad del tipo de residuo es de 0,486, lo que es mucho mayor de 0,05. Esto indica que el tipo de residuo no tiene un efecto significativo en el contenido de carbono fijo del biochar.

Desde un punto de vista teórico, el contenido de carbono fijo en el biochar se ve influenciado por la degradación térmica y la reestructuración química de la biomasa durante la carbonización hidrotérmica [47]. En este caso, se observa que el tiempo de reacción influye notablemente en la cantidad de carbono fijo retenido, lo que sugiere que tiempos más elevados podrían lograr un material más carbonoso. Sin embargo, el hecho de que el tipo de residuo no tenga efecto significativo indica que, bajo las mismas condiciones de HTC, los residuos analizados generan biochar con proporciones de carbono fijo similares.

4.2.4 Poder calorífico

En la Tabla 4-35 se muestran los resultados de poder calorífico obtenidos mediante los ensayos de pirólisis asistida por microondas:

Biochar	Ensayo 450 W	Ensayo 600 W	Ensayo 800 W
Cáscara de naranja	4081,82	3691,70	4176,09
Piel de plátano	2759,12	3102,80	3102,80
Posos de café	4738,85	4986,74	4986,74
Piel de patata	3412,53	3510,17	3510,17

Tabla 4-35 Poder calorífico: pirólisis asistida por microondas (kcal/kg)

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Potencia	6028904,35	3	2009634,785	67,0581185	5,26E-05	4,76E+00
Residuos	78161,4325	2	39080,71626	1,30405749	0,339	5,14E+00
Error	179811,32	6	29968,553			
Total	6286877,11	11				

Tabla 4-36 ANOVA poder calorífico: pirólisis asistida por microondas

Como se puede observar en la Tabla 4-36, el factor de probabilidad asociado a la potencia aplicada en la pirólisis asistida por microondas es de 0,0000526. Dado que este valor es muy inferior a 0,05, se rechaza la hipótesis nula, lo que indica que la potencia utilizada influye significativamente en el poder calorífico del biochar obtenido. Esto sugiere que un aumento en la potencia aplicada durante la pirólisis favorece la formación de un biochar con mayor capacidad energética.

Por otro lado, el factor de probabilidad correspondiente al tipo de residuo es de 0,339, un valor superior a 0,05. Esto indica que el tipo de residuo no tiene un impacto significativo en el poder calorífico del biochar. En consecuencia, bajo las mismas condiciones de pirólisis, la variabilidad en el poder calorífico se debe principalmente a la potencia aplicada y no a la composición inicial.

Desde un punto de vista teórico, el poder calorífico del biochar depende en gran medida de su contenido de carbono y de la reducción de oxígeno durante la conversión térmica. Como se ha observado en los análisis previos, los residuos con mayor contenido de carbono suelen presentar un poder calorífico más alto, especialmente los posos de café, que alcanzan valores superiores a 4900 kcal/kg. Sin embargo, dado que el tipo de residuo no afecta significativamente el poder calorífico, se confirma que la potencia aplicada en la pirólisis es un factor determinante.

A continuación, en la Tabla 4-37 se muestran los resultados del poder calorífico obtenido tras el proceso de HTC:

Biochar	Ensayo 2 h	Ensayo 4 h
Cáscara de naranja	3676,27	3835,94
Piel de plátano	3215,48	3592,47
Posos de café	4911,16	4850,71
Piel de patata	3002,92	2929,64

Tabla 4-37 Poder calorífico: HTC (kcal/kg)

ANÁLISIS DE
VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Tiempo	4025979,1	3	1341993,033	59,184	0,004	9,277
Residuos	20294,126	1	20294,126	0,895	0,414	10,128
Error	68024,914	3	22674,971			
Total	4114298,14	7				

Tabla 4-38 ANOVA poder calorífico: HTC

Como se puede observar en la Tabla 4-38, el factor de probabilidad correspondiente al tiempo de reacción en HTC es de 0,004. Dado que este valor es menor que 0,05, se rechaza la hipótesis nula, lo que indica que el tiempo de carbonización hidrotermal influye significativamente en el poder calorífico del biochar obtenido. Esto sugiere que una mayor duración del proceso de HTC puede favorecer la conversión del material en un biochar con mayor capacidad energética.

Por otro lado, el factor de probabilidad asociado al tipo de residuo es de 0,414, un valor superior a 0,05. Esto indica que el tipo de residuo no tiene un impacto significativo en el poder calorífico del biochar generado a través de HTC. En consecuencia, la variabilidad observada en el poder calorífico de los diferentes biochar obtenidos mediante este método se debe principalmente al tiempo de reacción y no a la composición inicial de los residuos.

Desde un punto de vista teórico, el poder calorífico del biochar está influenciado por su contenido de carbono fijo y la reducción de oxígeno durante la conversión térmica. Como se ha observado en los análisis previos, los posos de café presentan los valores más altos de poder calorífico (>4900 kcal/kg), lo que los hace más adecuados para aplicaciones energéticas.

En contraste, la piel de patata presenta los valores más bajos (~3000 kcal/kg), lo que podría limitar su viabilidad como biocombustible. Estos resultados confirman que, en el proceso de HTC, el tiempo de reacción es un factor determinante en la calidad del biochar en términos energéticos, mientras que el tipo de residuo no ejerce un impacto significativo.

4.3 Comparativa de métodos

En este apartado se analizarán las características más relevantes del biochar obtenido a partir de distintos métodos de producción. Se compararán los resultados alcanzados por el método de carbonización hidrotermal (HTC) convencional, estudiado previamente por el AN Castellanos [39], el método de HTC con autoclave y la pirólisis asistida por microondas. El objetivo de esta comparativa es identificar cuál de estos métodos ofrece los mejores resultados y determinar qué método es más efectivo para cada tipo de residuo.

4.3.1 Cáscara de naranja

Se examinará el rendimiento, el carbono fijo, el poder calorífico y las cenizas obtenidos a partir de la cáscara de naranja utilizando los distintos métodos de producción de biochar. El objetivo es identificar cuál de estos procesos proporciona los mejores resultados para este residuo.

4.3.1.1 Rendimiento

En primer lugar, se analiza el rendimiento obtenido para la cáscara de naranja, permitiendo relacionarlo con el carbono fijo presentado en el siguiente apartado:

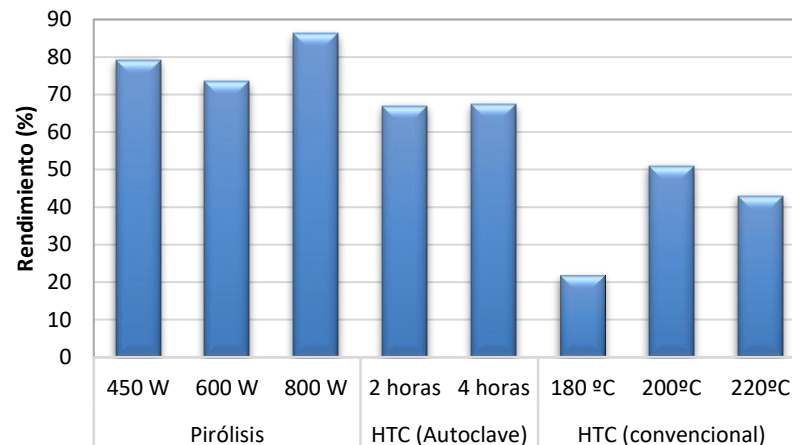


Figura 4-4 Rendimiento: cáscara de naranja

Se puede observar en la Figura 4-4 que el método de pirólisis asistida por microondas es el que ofrece mejores resultados de rendimiento, destacando que, a mayor potencia, mejores resultados se obtienen. En particular, se destaca que a 800 W se alcanza el valor más alto del rendimiento, lo que confirma la tendencia de que potencias más elevadas favorecen la conversión del residuo en biochar,

Por otro lado, la carbonización hidrotermal convencional es la técnica que genera los valores más bajos de rendimiento, especialmente a 180 °C, donde se obtiene un porcentaje inferior al 25 %. Este resultado reafirma la teoría de que mayores temperaturas generan un rendimiento más bajo [58].

En cuanto al HTC de autoclave, se observa que el tiempo no provoca variaciones notables en el rendimiento de este residuo, lo que indica que el proceso alcanza equilibrio en la conversión del residuo en biochar.

4.3.1.2 Carbono fijo

A continuación, se examina el carbono fijo generado en la cáscara de naranja mediante los distintos métodos para comparar su eficiencia en la retención de carbono.

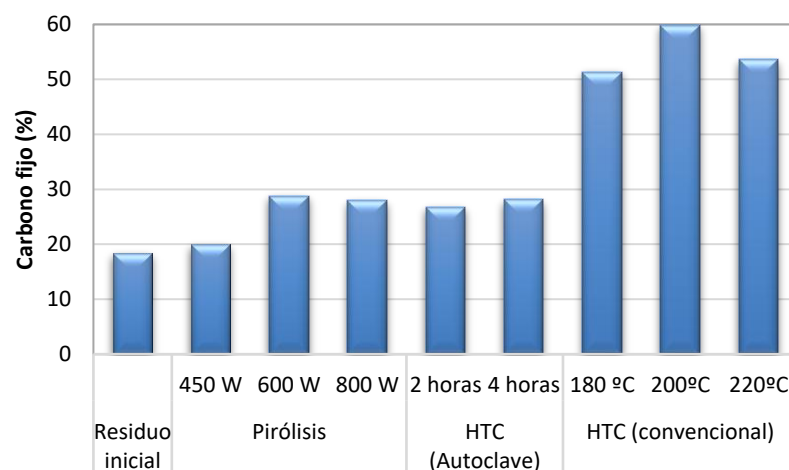


Figura 4-5 Carbono fijo: cáscara de naranja

La Figura 4-5 muestra que la HTC convencional es el método que obtiene los mejores resultados en términos de carbono fijo, con valores en torno al 50-60 %. En particular, a 200 °C se alcanza el mayor porcentaje, llegando al 60 % lo que indica que este método favorece la retención de carbono en el biochar.

Comparando con el residuo inicial, se observa que el contenido de carbono fijo aumenta de manera considerada tras el proceso, lo que sugiere una transformación efectiva de la biomasa.

En contraste, tanto la pirólisis asistida por microondas como HTC con autoclave presentan resultados similares en lo que a contenido en carbono fijo se refiere, con valores próximos al 30 %. El menor valor se obtiene en la pirólisis a 450 W, lo que sugiere que el aumento de potencia favorece la retención de carbono, aunque la mayor eficiencia dentro de este grupo se observa en la pirólisis a 600 W, que logra los mejores resultados después de la HTC convencional.

En relación con el rendimiento, se puede concluir que a medida que el rendimiento disminuye, el porcentaje de carbono fijo aumenta. Esto se debe a que, al obtenerse una menor cantidad de biochar, la concentración de carbono estructural en el material final es mayor [58].

4.3.1.3 Poder calorífico

A continuación, se analiza el poder calorífico obtenido para la cáscara de naranja.

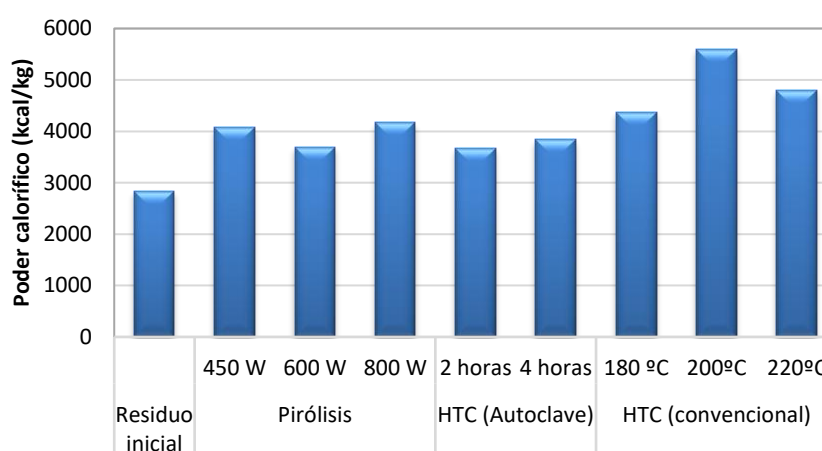


Figura 4-6 Poder calorífico: cáscara de naranja

La Figura 4-6 muestra que el HTC convencional es el método que genera los mejores resultados en términos de poder calorífico, con valores en el rango de 4000-5600 kcal/kg. En particular, a 200 °C se alcanza el valor más alto, lo que indica que este método favorece la conversión del residuo en un material con mayor potencial energético.

Al comparar con el residuo inicial, se observa un incremento significativo en el poder calorífico tras el tratamiento, lo cual se relaciona con el aumento en el contenido de carbono, ya que un mayor porcentaje de carbono fijo tiende a incrementar el poder calorífico del biochar.

Por otro lado, tanto la pirólisis asistida por microondas como la HTC con autoclave presentan valores más estables, oscilando entre 3600-4000 kcal/kg. En el caso de la HTC con autoclave, se observa que el tiempo de reacción no influye de manera significativa en el poder calorífico, ya que los valores obtenidos a 2 y 4 horas son similares.

En el caso de la pirólisis asistida por microondas, los valores tampoco presentan una variación marcada entre potencias, lo que sugiere que el poder calorífico del biochar obtenido por este método se mantiene relativamente constante independientemente de la energía aplicada.

Estos resultados indican que, si el objetivo es maximizar el poder calorífico del biochar, la carbonización hidrotermal convencional a 200 °C es la mejor opción para este residuo.

4.3.1.4 Contenido en cenizas

A continuación, se analiza el contenido de cenizas obtenido para la cáscara de naranja.

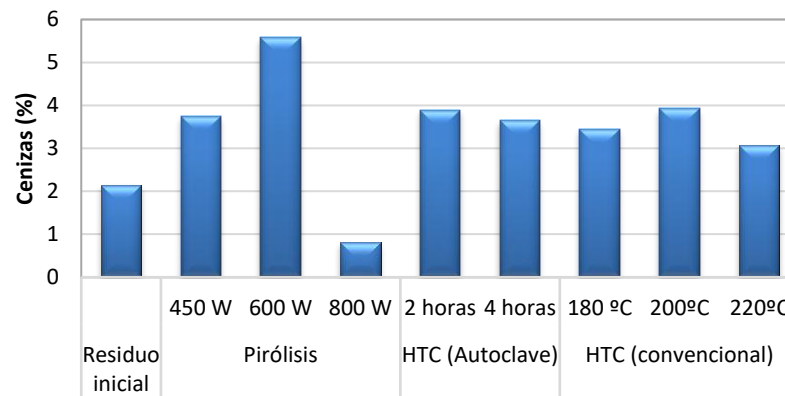


Figura 4-7 Cenizas: cáscara de naranja

La Figura 4-7 muestra que la pirólisis asistida por microondas a 600 W genera el mayor contenido de cenizas, superando 5 % mientras que a 800 W se obtiene un valor considerablemente más bajo. Este comportamiento muestra anomalías ya que generalmente, un aumento de potencia va ligado a un aumento de cenizas ya que existe una mayor degradación del material orgánico [56]. En contraste, a 600 W, la conversión térmica puede ser menos completa, dejando un porcentaje mayor de material carbonizado con residuos inorgánicos en forma de ceniza.

Por otro lado, el HTC con autoclave muestra valores de ceniza estables, lo que sugiere que el tiempo de reacción no tiene un efecto significativo en esta propiedad. En cambio, la HTC convencional presenta valores similares, probablemente debido a la mayor retención de compuestos inorgánicos durante el proceso [43].

En conclusión, aunque la tendencia general es que a mayor potencia se obtenga un mayor contenido de cenizas, en este caso específico, la pirólisis a 800 W parece haber favorecido una conversión más eficiente del residuo, reduciendo la acumulación de materiales inorgánicos en el biochar final.

4.3.2 Piel de plátano

Se examinará el rendimiento, el carbono fijo, el poder calorífico y las cenizas obtenidos a partir de la piel de plátano utilizando los distintos métodos de producción de biochar. El objetivo es identificar cuál de estos procesos proporciona los mejores resultados para este residuo.

4.3.2.1 Rendimiento

En primer lugar, se analiza el rendimiento obtenido para la piel de plátano, permitiendo relacionarlo con el carbono fijo presentado en el siguiente apartado:

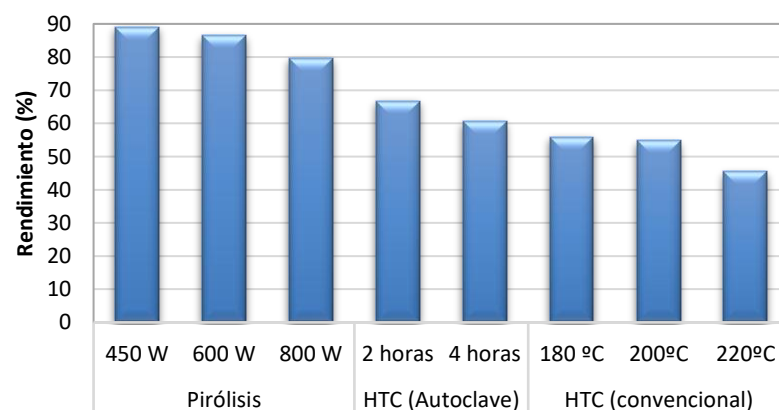


Figura 4-8 Rendimiento: piel de plátano

Se puede observar en la Figura 4-8 que el método de pirólisis asistida por microondas es el que obtiene mejor resultado. A diferencia de lo observado en la cáscara de naranja, en este caso, el rendimiento disminuye a medida que la potencia aumenta, siendo 450 W la potencia que genera mayor rendimiento.

En el caso de HTC con autoclave, se aprecia una tendencia similar, donde un mayor tiempo de reacción provoca una ligera reducción en el rendimiento.

Por otro lado, HTC convencional mantiene valores de rendimiento relativamente estables, excepto a 220 °C, donde se observa una disminución más pronunciada.

4.3.2.2 Carbono fijo

Seguidamente, se examina el carbono fijo generado en la piel de plátano mediante los distintos métodos para comparar su eficiencia en la retención de carbono.

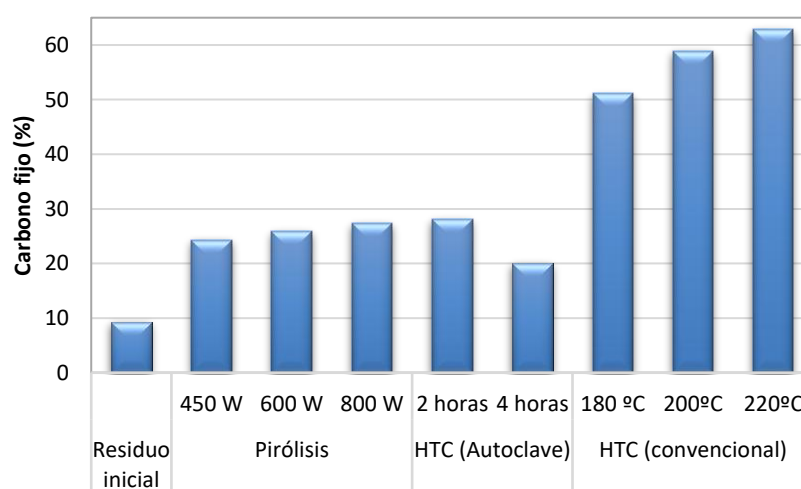


Figura 4-9 Carbono fijo: piel de plátano

La Figura 4-9 muestra que la HTC convencional es el método que mejores resultados genera en términos de carbono fijo para la piel de plátano, alcanzando su valor más alto a 220 °C con un 62 %. Comparando con el residuo inicial, el aumento del contenido de carbono fijo tras este proceso es significativo, con una diferencia de aproximadamente un 50 %.

En contraste, HTC con autoclave muestra una tendencia inversa, donde un mayor tiempo de exposición da lugar a una menor cantidad de carbono fijo.

Por otro lado, la pirólisis asistida por microondas presenta un ligero aumento de carbono fijo a medida que se incrementa la potencia, aunque los valores obtenidos oscilan entre un 24-27 %. Esto indica que las diferencias entre potencias no son lo suficientemente pronunciadas como para considerarse significativas. Aun así, en comparación con el residuo inicial, se observa un aumento considerable en el contenido de carbono fijo.

En términos generales, se reafirma la relación entre rendimiento y carbono fijo, ya que los métodos que presentan los valores más altos de rendimiento son los que han obtenido porcentajes menores de carbono fijo. Esto sugiere que, en los procesos con mayor rendimiento, la materia orgánica no se ha degradado completamente, reteniendo más compuesto volátiles y reduciendo la proporción estructural en el biochar.

4.3.2.3 Poder calorífico

A continuación, se analiza el poder calorífico obtenido para la piel de plátano.

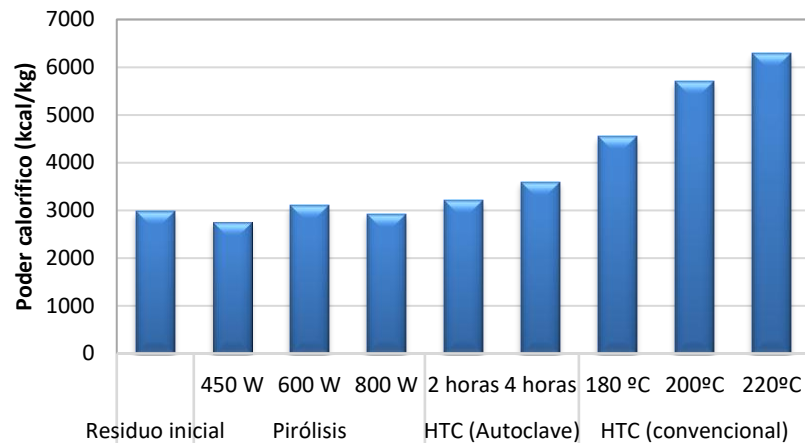


Figura 4-10 Poder calorífico: piel de plátano

La Figura 4-10 muestra que el HTC convencional es el método que genera los mejores resultados en términos de poder calorífico, con valores entre los 4543 y 6285 kcal/kg. En este caso, se observa una tendencia creciente con el aumento de temperatura, alcanzando su valor más alto a 220 °C, lo que indica que a una mayor temperatura el material tendrá mejor capacidad energética.

En comparación con el residuo inicial, se observa un aumento significativo en el poder calorífico después del proceso, lo que se debe a una mayor concentración de carbono fijo en el biochar. Esto confirma la relación directa entre el contenido de carbono y el poder calorífico.

Por otro lado, los valores obtenidos en pirólisis asistida por microondas y HTC con autoclave son más bajos, obteniendo un rango de 2760-3592 kcal/kg. En el caso de pirólisis asistida por microondas, los valores se mantienen estables sin una variación significativa entre las diferentes potencias.

En el caso de HTC con autoclave, se aprecia un ligero aumento de poder calorífico al aumentar el tiempo a 4 horas.

Estos resultados indican que, si el objetivo es maximizar el poder calorífico del biochar, el HTC convencional a 220 °C es la mejor opción para este residuo.

4.3.2.4 Contenido en cenizas

A continuación, se analiza el contenido de cenizas obtenido para la piel de plátano.

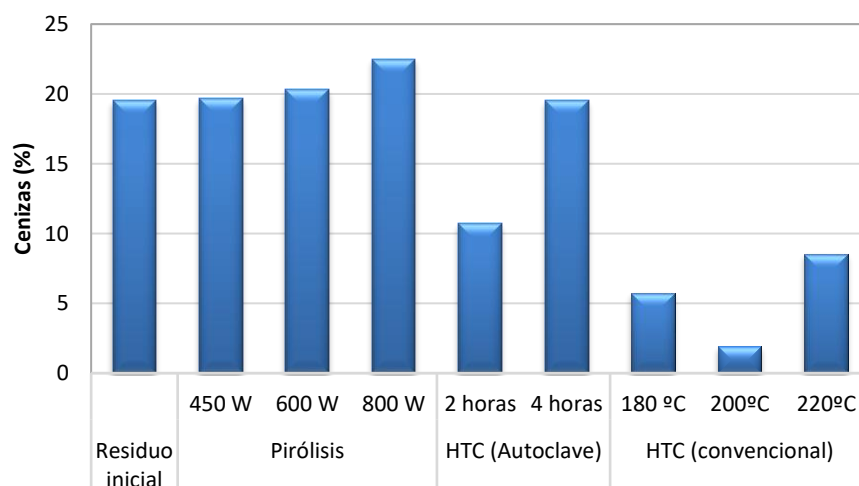


Figura 4-11 Cenizas: piel de plátano

En la Figura 4-11 se observa que la pirólisis asistida por microondas genera los valores más altos de contenido de cenizas con un rango entre el 20 y 22 %, además se aprecia que este incremento se produce a su vez con el incremento de potencia. Por lo tanto, esta técnica concuerda con la tendencia de que la potencia favorece la eliminación de la materia orgánica [56].

En el caso del HTC con autoclave, el contenido de cenizas varía dependiendo del tiempo de reacción. Se observa que un mayor tiempo del procedimiento favorece la concentración de material inorgánico en el biochar.

Por otro lado, el HTC convencional presenta los valores más bajos de cenizas, especialmente a 200 °C, lo que sugiere que este método permite una mejor retención de materia orgánica sin generar una acumulación elevada de residuos inorgánicos [56].

Estos resultados muestran que, si el objetivo es reducir el contenido de cenizas, el HTC convencional es la mejor opción, además de que este comportamiento se relaciona con un alto porcentaje de carbono fijo. Si lo que se quiere es generar un biochar con un mayor contenido de materiales inorgánicos y bajo poder calorífico [43], el método de pirólisis es el más acertado.

4.3.3 Posos de café

Se examinará el rendimiento, el carbono fijo, el poder calorífico y las cenizas obtenidos a partir de los posos de café utilizados los distintos métodos de producción de biochar. El objetivo es identificar cuál de estos procesos proporciona los mejores resultados para este residuo.

4.3.3.1 Rendimiento

En primer lugar, se analiza el rendimiento obtenido para los posos de café, permitiendo relacionarlo con el carbono fijo presentado en el siguiente apartado:

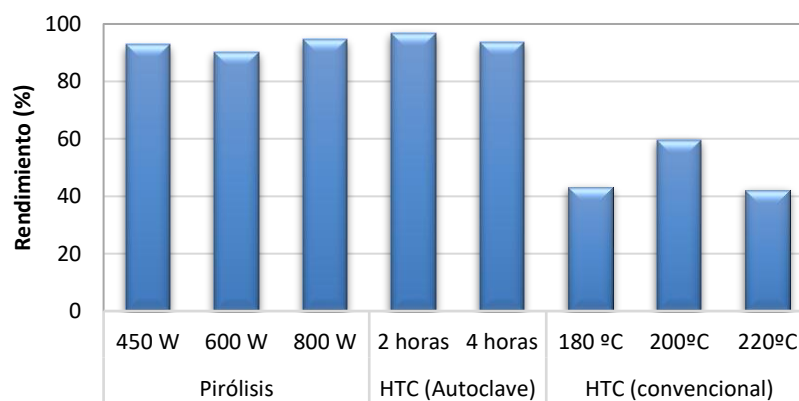


Figura 4-12 Rendimiento: posos de café

La Figura 4-12 muestra que HTC con autoclave es el método que genera los mejores resultados de rendimiento en los posos de café, con valores muy similares entre ambos tiempo de reacción. Esto indica que el tiempo de exposición en el autoclave no tiene un impacto significativo en el rendimiento, lo que sugiere que el proceso alcanza un punto de estabilidad independientemente de la duración.

En el caso de la pirólisis asistida por microondas, los resultados son también bastante elevados, con valores superiores al 90% en todas las potencias estudiadas. Aunque se observa una ligera mejora a 800 W, esta variación es mínima, por lo que no se puede concluir que el aumento de potencia tenga un efecto relevante en este parámetro.

Por otro lado, HTC convencional muestra una mayor variabilidad en los resultados, con el mayor rendimiento alcanzado a 200 °C. Sin embargo, a temperaturas más bajas (180 °C) y más altas (220 °C),

el rendimiento disminuye notablemente, lo que indica que este método es más sensible a la temperatura y que existe un rango óptimo en el que se obtienen mejores resultados

4.3.3.2 Carbono fijo

A continuación, se analiza el carbono fijo presente en los posos de café tras los diferentes tratamientos aplicados, con el fin de determinar la técnica más efectiva.

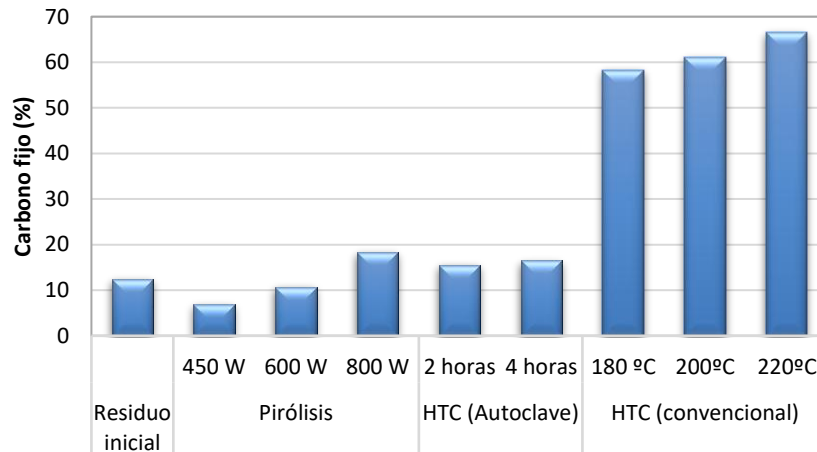


Figura 4-13 Carbono fijo: posos de café

En la Figura 4-13 se observa que HTC convencional es nuevamente el método que genera el mayor porcentaje de carbono fijo en los posos de café. Se observa una tendencia ascendente a medida que aumenta la temperatura, alcanzando su valor máximo a 220 °C.

Por el contrario, tanto la pirólisis asistida por microondas como HTC con autoclave generan unos porcentajes de carbono fijo considerablemente más bajos, lo que sugiere que estos métodos no son los más adecuados para maximizar la retención de carbono en este residuo.

En el caso de la pirólisis asistida por microondas, se aprecia que la potencia de 800 W logra un aumento notable de carbono fijo en comparación con potencias inferiores, lo que indica que una mayor potencia favorece la carbonización del material. Sin embargo, a 450 W se observa incluso una reducción en el contenido de carbono fijo respecto al residuo original, lo que sugiere que, a potencias bajas, el proceso no es suficientemente eficiente para lograr una conversión significativa.

4.3.3.3 Poder calorífico

A continuación, se analiza el poder calorífico obtenido para los posos de café.

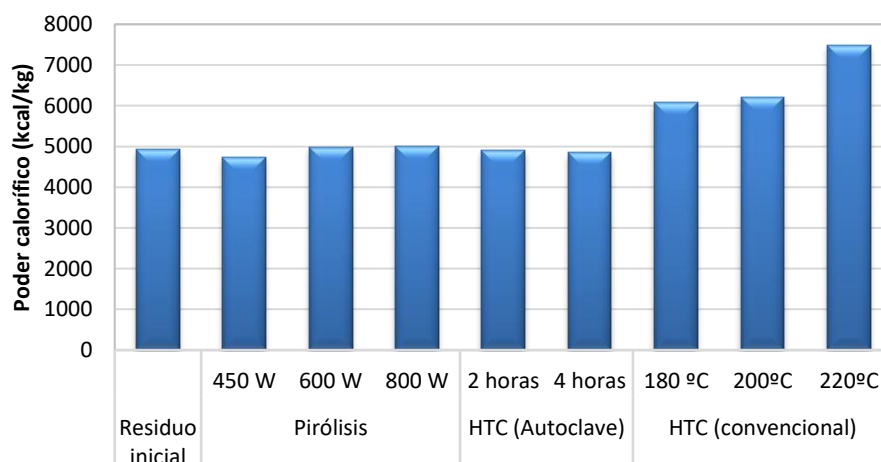


Figura 4-14 Poder calorífico: posos de café

La Figura 4-14 muestra que el HTC convencional es el método que alcanza los mejores resultados de poder caloríficos, con rangos entre 5000-7500 kcal/kg. Se observa que a 220 °C se alcanza su máximo, habiéndose notado un incremento progresivo. Este método sugiere que optimiza la conversión del residuo en un material con alto contenido energético.

En comparación con el residuo inicial, la HTC convencional experimenta un incremento considerable, lo que se atribuye a una mayor concentración de carbono fijo tras el tratamiento. Sin embargo, contrastando con los otros dos métodos, no se observa una variación significativa de poder calorífico.

En el caso tanto de pirólisis como de HTC con autoclave, los valores se mantienen constantes en torno a 5000 kcal/kg sin mostrar variación significativa con respecto al incremento de potencia o tiempo de reacción del proceso. Por lo que estos métodos no influyen de manera directa en la mejora del poder calorífico de los posos de café.

Estos resultados indican que, si el objetivo es maximizar el poder calorífico del biochar, la HTC convencional a 220 °C es la mejor opción para los posos de café. Sin embargo, debido a que los valores iniciales del residuo ya eran elevados, cualquier método aplicado mantiene un nivel de poder calorífico alto en comparación con otros residuos.

4.3.3.4 Contenido en cenizas

A continuación, se analiza el contenido de cenizas obtenido para los posos de café.

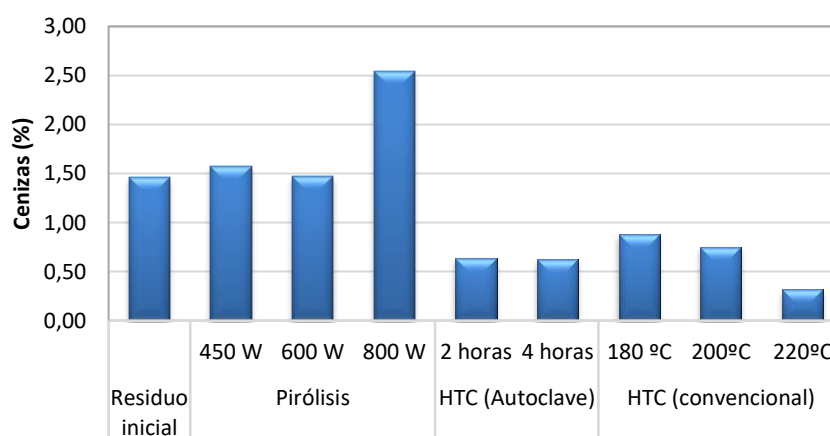


Figura 4-15 Cenizas: posos de café

En la Figura 4-15 se observa que el mejor resultado se obtiene en la pirólisis asistida por microondas a una potencia de 800 W, alcanzando aproximadamente un 2,5 % de contenido de cenizas. Sin embargo, en comparación con los residuos analizados anteriormente, los posos de café presentan valores relativamente bajos, lo que sugiere que el biochar generado contiene una menor cantidad de material inorgánico.

El método de HTC con autoclave muestra valores aún más reducidos, con escasa diferencia entre los tiempos evaluados. Por otro lado, la HTC convencional presenta una tendencia menos uniforme, ya que los valores de cenizas no siguen la relación esperada de incremento con la temperatura [56], lo que sugiere que otros factores pueden estar influyendo en la composición del biochar.

Estos resultados indican que, si el objetivo es obtener un biochar con bajo contenido de cenizas, la carbonización hidrotermal con autoclave es la mejor opción, debido a su estabilidad en los valores obtenidos.

4.3.4 Piel de patata

Al igual que en casos anteriores, se compararán los valores de rendimiento, carbono fijo, poder calorífico y cenizas obtenidos a partir de la piel de patata en función del método empleado. Con ello, se busca establecer cuál de las técnicas utilizadas proporciona mejores resultados para este residuo.

4.3.4.1 Rendimiento

En primer lugar, se analiza el rendimiento obtenido para la piel de patata, permitiendo relacionarlo con el carbono fijo presentado en el siguiente apartado:

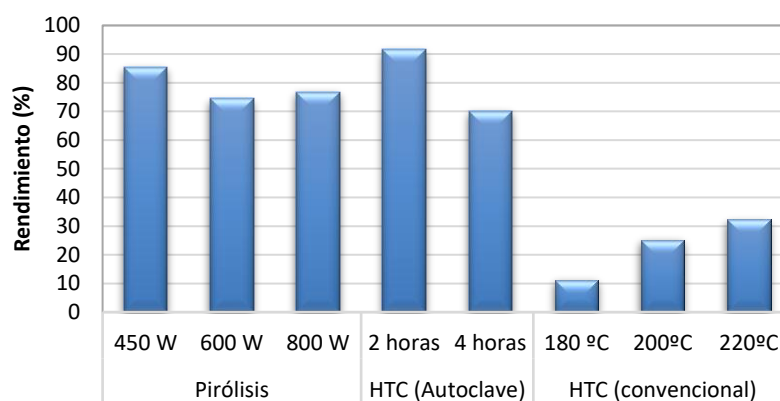


Figura 4-16 Rendimiento: piel de patata

La Figura 4-16 muestra que HTC con autoclave es el método que alcanza los valores más altos de rendimiento para la piel de patata, alcanzando el valor máximo con el tiempo de 2 horas. Sin embargo, cuando el tiempo de reacción aumenta a 4 horas, el rendimiento disminuye ligeramente.

En el caso de la pirólisis asistida por microondas, los valores de rendimiento son también elevados y relativamente constantes entre las diferentes potencias, con una ligera disminución a medida que la potencia aumenta. Al igual que en otros residuos, esto podría indicar que una mayor energía favorece la volatilización de compuestos, reduciendo el rendimiento sólido obtenido.

Por otro lado, la HTC convencional presenta los valores más bajos de rendimiento, con una tendencia creciente a medida que la temperatura aumenta. A 180 °C, el rendimiento es notablemente bajo y a 220 °C, el rendimiento mejora, aunque sigue siendo inferior a los otros métodos.

4.3.4.2 Carbono fijo

Seguidamente, se analiza el carbono fijo obtenido en la piel de patata.

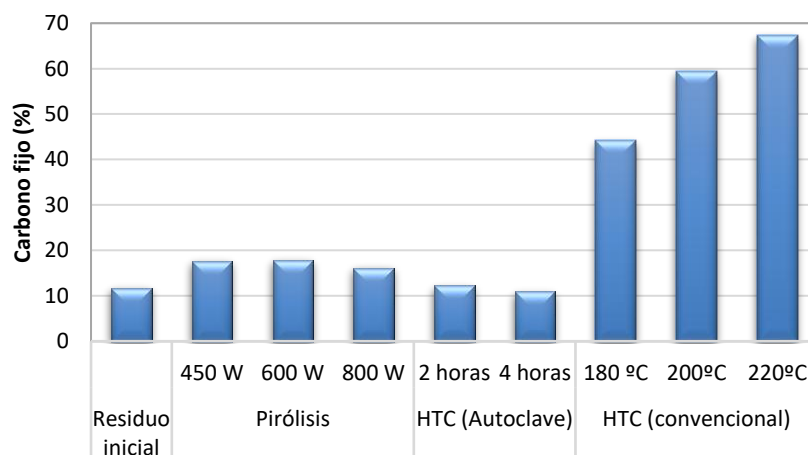


Figura 4-17 Carbono fijo: piel de patata

La Figura 4-17 muestra que HTC convencional es el método que obtiene los mayores valores de carbono fijo, con una tendencia ascendente a medida que la temperatura aumenta. En particular, a 220 °C se alcanza el valor más alto, lo que indica que este método es el más efectivo para la retención de carbono en esta tipología de residuo.

Por otro lado, HTC con autoclave presenta los valores más bajos de carbono fijo, sin una variación significativa entre los dos tiempos de reacción. Esto sugiere que, para la piel de patata, este método no favorece la fijación de carbono de manera eficiente.

En cuanto a la pirólisis asistida por microondas, se observa que los valores de carbono fijo son similares entre las distintas potencias aplicadas, con ligeras variaciones. Aunque hay un pequeño incremento respecto al residuo inicial, la diferencia no es tan notable en comparación con la HTC convencional.

Al igual que en los otros residuos analizados, se confirma que existe una relación inversa entre el rendimiento y el carbono fijo. Mientras que HTC con autoclave y la pirólisis generan altos rendimientos, su contenido de carbono fijo es menor. En cambio, HTC convencional, que presenta los valores más bajos de rendimiento, logra una mayor retención de carbono. Esto reafirma que, en procesos donde se obtiene menos biochar, este suele estar más enriquecido en carbono fijo, lo que sugiere una mayor degradación de la materia volátil y una mayor estabilidad del material carbonizado [58].

4.3.4.3 Poder calorífico

A continuación, se analiza el poder calorífico obtenido para la piel de patata.

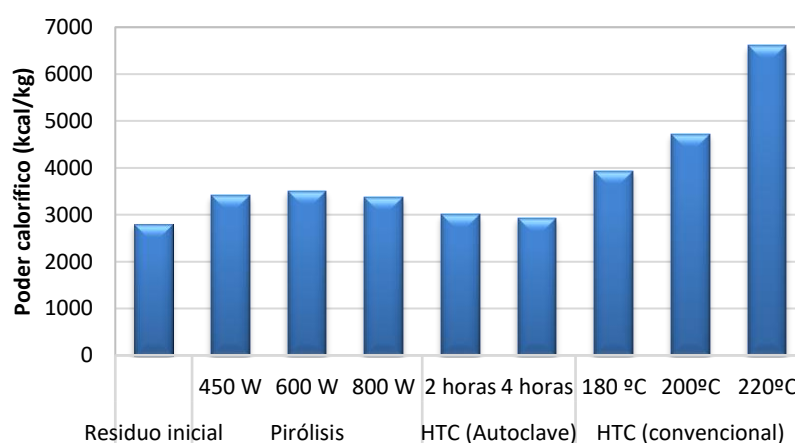


Figura 4-18 Poder calorífico: piel de patata

La Figura 4-18 muestra que el HTC convencional es el método que alcanza los valores más altos de poder calorífico, con cifras entre 4000-6500 kcal/kg. Se observa una tendencia ascendente con el aumento de temperatura, alcanzando su valor máximo a 220 °C, lo que sugiere que este método favorece la conversión de la biomasa en un material con mayor eficiencia energética.

En comparación con el residuo inicial, se observa un aumento significativo del poder calorífico, lo cual se relaciona con el carbono fijo y la eliminación de compuestos volátiles.

Por otro lado, tanto la pirólisis asistida por microondas como la HTC con autoclave, presentan valores relativamente estables, con valores entre 3000-3800 kcal/kg. No se aprecia ninguna variación reseñable en cuanto a incremento de potencia o de tiempo de reacción. Esto indica que ambos métodos no afectan de una manera directa a la capacidad energética del biochar.

Estos resultados indican que, si el objetivo es maximizar el poder calorífico del biochar obtenido de la piel de patata, el HTC convencional a 220 °C es la opción más recomendable. Sin embargo, la pirólisis

asistida por microondas sigue siendo una alternativa viable con valores aceptables de poder calorífico, especialmente si se prioriza un proceso más rápido y eficiente energéticamente.

4.3.4.4 Contenido en cenizas

A continuación, se analiza el contenido de cenizas obtenido para la piel de patata.

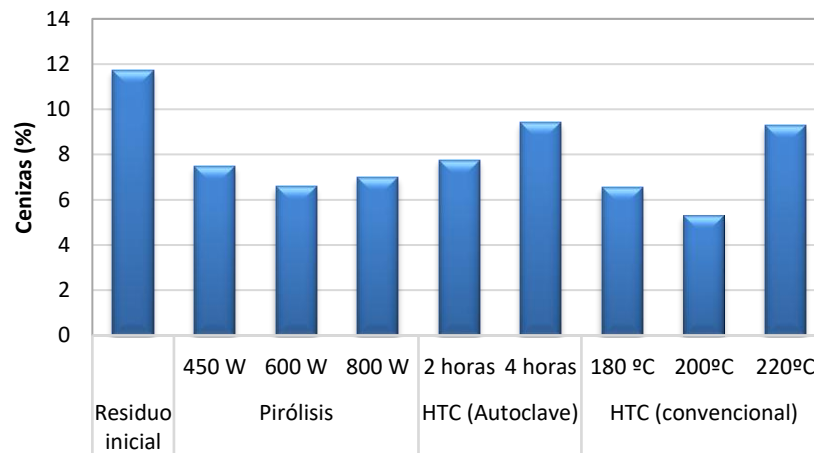


Figura 4-19 Cenizas: piel de patata

En la Figura 4-19 se observa que el residuo inicial presenta el mayor porcentaje de cenizas, lo que indica una alta presencia de material inorgánico antes del tratamiento. Tras los procesos de conversión de biochar, los valores disminuyen en todos los casos, aunque con variaciones según el método empleado.

En el caso de la pirólisis asistida por microondas, se obtienen valores relativamente homogéneos en las tres potencias utilizadas (7-8 %). Por otro lado, la carbonización hidrotermal con autoclave presenta valores ligeramente superiores a los obtenidos en pirólisis, especialmente a 4 horas, donde el porcentaje de cenizas es el más alto en comparación con los demás métodos.

En cuanto HTC convencional, el contenido de cenizas aumenta con la temperatura, alcanzando su punto máximo a 220 °C, lo que concuerda con la tendencia observada en otros residuos y otros estudios [56].

Estos resultados indican que, para minimizar la cantidad de cenizas en el biochar obtenido a partir de la patata, la pirólisis asistida por microondas sería la opción más adecuada. Sin embargo, si se requiere un mayor concentración de material inorgánico, el HTC con autoclave a 4 horas ofrecería el mayor contenido de cenizas.

4.3.5 Comparativa con estudios previos

Al comparar los resultados obtenidos en este estudio con investigaciones previas sobre pirólisis asistida por microondas, se observan diferencias significativas. En el trabajo realizado por et. Al ([32]), en el que se analizó la cáscara de mazorca de cacao, los rendimientos obtenidos oscilaron entre el 20 % y el 31 %. En contraste, ninguno de los residuos estudiados en este trabajo presenta valores similares. Una diferencia clave entre ambos estudios radica en las condiciones experimentales, ya que en la investigación de la Universidad Central de Ecuador se emplearon potencias de 600 W y 720 W, además de analizar tres intervalos de tiempo (10, 15 y 20 minutos) con el fin de determinar la duración óptima del proceso. En cuanto al contenido de carbono fijo, los resultados obtenidos en el estudio de Albacura Chuquín variaron entre el 40 % y el 55 %, un rango significativamente superior al registrado en este trabajo, donde los valores se encuentran entre el 6 % y el 30 %.

En el estudio de los autores Anissa Khelfa y Filipe Augusto ([33]), se analiza el método de pirólisis asistida por microondas utilizando potencia de 800 W durante 20 minutos. Al examinar los resultados

del residuo serrín de madera de pino, se observa que el rendimiento obtenido fue inferior al 24 %, un valor significativamente menor en comparación con los residuos estudiados en este trabajo, cuyos rendimientos superan el 70 %. Esta diferencia se refleja en el porcentaje de carbono, ya que en el estudio de Khelfa y Augusto se alcanzan valores elevados (79 %), mientras que en este trabajo los porcentajes de carbono fijo son más bajos debido a la relación inversa entre rendimiento y carbono fijo: a mayor rendimiento, mayor cantidad de biochar producido, pero con menor concentración de carbono estructural.

Por otro lado, en cuanto al poder calorífico, los resultados también presentan diferencias. Khlefa y Augusto obtienen valores superiores a 7000 kcal/kg, mientras que en este estudio los valores no superan las 5000 kcal/kg.

Por otro lado, el estudio de Laura Milena Bejaró y Paola Alexandra Aguilar sobre carbonización hidrotérmica (HTC) con autoclave ([28]) analizó los residuos de cebolla, maíz y arveja, obteniendo rendimientos elevados, entre el 88 % y el 97 %. Estos valores son comparables con los obtenidos en este estudio para los posos de café, cuyo rendimiento supera el 90 % en ambos tiempos de reacción, y para la piel de patata en el intervalo de 2 horas, donde también se alcanzan valores superiores al 90 %. Sin embargo, para el resto de los residuos analizados en este trabajo, los rendimientos fueron notablemente inferiores, situándose en un rango de entre el 65 % y el 70 %. Destaca particularmente la piel de plátano como el residuo con el menor rendimiento, en contraste con los valores reportados en el estudio de la Universidad de La Salle.

En cuanto al carbono fijo obtenido en ese mismo estudio, los resultados obtenidos en la piel de patata presentan una similitud con los valores obtenidos por las hojas de cebolla (11,53 %) según las autoras. Por otro lado, los porcentajes de carbono fijo alcanzados en la cáscara de maíz (12,33 %) y la cáscara de arveja (12,65 %) son comparables a los obtenidos en este estudio por los posos de café, lo que sugiere que estos residuos comparten características estructurales que influyen en la retención de carbono tras el proceso de carbonización hidrotérmica.

En cuanto al estudio de J. Chaparro-Garnica ([35]), que también emplea HTC con autoclave, se encuentra una diferencia metodológica relevante, ya que, en lugar de agua, se utilizó ácido fosfórico en el proceso. Este factor puede influir significativamente en los resultados y dificulta la comparación directa. En dicho estudio, el autor analizó la cañamiza y obtuvo rendimientos entre el 33 % y el 40 %, valores que no se asemejan ni a los resultados obtenidos en este trabajo ni a los reportados en la investigación de Bejarano y Aguilar ([28]). En lo que respecta al carbono fijo, Chaparro-Garnica obtuvo valores entre el 76 % y el 88 %, considerablemente superiores a los alcanzados en este estudio. Esto sugiere que la adición de ácido fosfórico puede mejorar la retención de carbono en el biochar, lo que representa una diferencia fundamental con respecto a los procesos convencionales de HTC con autoclave estudiados en este trabajo.

Finalmente, en el estudio de la autora Estefanía Ponce Ballester ([36]), se estudia el método de HTC con autoclave. En cuanto al rendimiento, los valores obtenidos para residuos como los huesos de ciruela, cereza o nectarina, oscilan entre el 50-60 %, lo cual es comparable al rendimiento obtenido por la piel de plátano en este estudio. Sin embargo, en lo que respecta al contenido de carbono fijo, los valores alcanzados en dicho estudio son más elevados que los obtenidos con los residuos analizados en este trabajo, lo que indica una mayor retención de carbono en los biochar producidos.

Por último, al contrastar el poder calorífico, el residuo que más se asemeja a los valores obtenidos por las autoras son los posos de café, cuyos resultados rondan las 5000 kcal/kg. No obstante, en el estudio de referencia, todos los residuos analizados presentan valores superiores a 5200 kcal/kg.

Se podría decir que los resultados obtenidos en este estudio muestran diferencias significativas con las investigaciones previas debido a variaciones en los residuos utilizados, las condiciones experimentales y los tratamientos aplicados en cada proceso. Estas diferencias resaltan la importancia

de ajustar los parámetros de operación para cada tipo de biomasa con el fin de optimizar la producción de biochar y mejorar sus propiedades.

4.4 Aplicaciones del biochar obtenido

En este apartado se analizan las posibles aplicaciones del biochar obtenido a través de los dos métodos estudiados en este trabajo. Entre las principales aplicaciones se encuentran su uso en la mejora de suelos, adsorbente de contaminantes, material para almacenamiento de energía, tratamientos de aguas y su aprovechamiento en procesos de combustión. La viabilidad de cada una de estas aplicaciones dependerá de las propiedades específicas del biochar producido, como su contenido en carbono fijo, porosidad, contenido en cenizas o poder calorífico.

4.4.1 Adsorción

La propiedad de adsorción del biochar hace referencia a su capacidad para capturar y retener sustancias en su superficie, lo que lo convierte en un material necesario para la mejora de suelos, tratamiento de aguas y la captura de gases contaminantes [56].

Uno de los factores más importantes a considerar es la porosidad, ya que un biochar altamente poroso ofrece una mayor superficie de contacto, favoreciendo la adsorción de gases [56]. Además, el pH juega un papel fundamental en la adsorción, ya que influye en la carga superficial del material. Un pH ácido facilita la adsorción de nitratos, fosfatos y colorantes, mientras que un pH alcalino promueve la adsorción de metales pesados.

Por otro lado, el contenido de cenizas también es un parámetro relevante. En general, un biochar con bajo contenido de cenizas y alta concentración de carbono se considera de mayor calidad, ya que su estructura es más eficiente para la adsorción de contaminantes [56].

Teniendo en cuenta estas características, el residuo que presenta los valores más favorables según el análisis realizado son los posos de café obtenidos mediante el método de carbonización hidrotermal con autoclave a 2 horas, una porosidad del 95,65 %, un pH de 5,64 y un contenido en cenizas de 0,64 %. Aunque el pH no es muy elevado, la combinación de estos parámetros sugiere que este biochar podría ser el más adecuado para este uso.

Por otro lado, el biochar obtenido a partir de la cáscara de naranja mediante pirólisis asistida por microondas a 450 W, también presenta resultados prometedores, alcanzando una porosidad del 92,31 %, un pH de 5,37 así como un contenido en cenizas del 3,75 %.

A pesar de que la piel de patata tratada por pirólisis ha registrado el pH más alto, su contenido de cenizas supera el 7 %, lo que ha llevado a descartarla como opción. Para este uso, el contenido de cenizas se ha establecido como un factor determinante, priorizando residuos con valores más bajos de este parámetro.

4.4.2 Mejora de suelos

Para que un biochar sea adecuado para la mejora de suelos, es fundamental analizar una serie de parámetros que determinan su compatibilidad con las condiciones del suelo y su efectividad en la optimización de sus propiedades.

Uno de los primeros aspectos a considerar es el pH del suelo, ya que permite seleccionar el tipo de biochar más adecuado para su aplicación. En suelos ácidos ($\text{pH} < 5,5$), es recomendable utilizar un biochar con carácter básico para contrarrestar la acidez y mejorar la disponibilidad de nutrientes esenciales para las plantas [57]. Por otro lado, un biochar con baja acidez puede ser beneficioso como fertilizante en suelos calcáreos [56].

Otro aspecto relevante es el contenido de carbono fijo, ya que un porcentaje elevado favorece la retención de nutrientes y el aumento de materia orgánica en el suelo, contribuyendo a la estabilidad y fertilidad del suelo [59]. En este estudio, solo los biochar obtenidos a partir de posos de café alcanzaron

valores superiores al 50 % en todas las condiciones analizadas, lo que los hace aptos para su aplicación directa en suelos. En contraste, los biochar de cáscara de naranja, piel de plátano y piel de patata presentaron valores inferiores, lo que podría limitar su efectividad sin un tratamiento adicional [63].

Finalmente, la porosidad del biochar es importante en la mejora de suelos ya que mejora la retención de agua y nutrientes, proporcionando un ambiente más favorable para el desarrollo de microorganismos beneficiosos que contribuyen a la fertilidad de dicho suelo [59].

Teniendo en cuenta estos parámetros, el residuo que mejor se ajusta a las características requeridas es la piel de patata tratada mediante pirólisis asistida por microondas a 800 W, alcanzando una porosidad del 90,91 %, un pH de 7,33 y un contenido en carbono del 16,17 %. Aunque existen otros residuos que presentan un porcentaje de carbono más elevado, en este caso se ha considerado el pH como el factor determinante, ya que es la principal propiedad que influye en la mejora de los suelos.

4.4.3 Tratamiento de aguas

Para que un biochar sea adecuado para el tratamiento de aguas, es necesario considerar varios factores que influyen en su capacidad de adsorción de contaminantes. En primer lugar, por norma general, se requiere la activación del carbono para mejorar el área superficial y la porosidad, lo que optimiza la retención de metales pesados y compuestos orgánicos [60]. En este estudio, no ha sido posible llevar a cabo la activación del carbono, esta activación será propuesta como línea futura para mejorar sus propiedades, sin embargo, se ha estudiado igualmente la porosidad de los diferentes biocarbons obtenidos.

Además, el pH del biochar es un parámetro determinante, ya que un pH básico favorece la interacción de ciertos contaminantes con la superficie del material, facilitando su eliminación del agua [61].

El contenido de cenizas también es un factor a considerar, ya que valores elevados pueden reducir la capacidad de intercambio iónico del biochar y afectar su rendimiento en el tratamiento de aguas [61].

En este estudio, se han analizado la porosidad, el carbono fijo, el contenido de cenizas y el pH para determinar qué residuo es el más adecuado para esta aplicación. Además, se tomará en cuenta que, para mejorar la eficiencia del proceso, sería recomendable la activación del biochar en estudios futuros.

Teniendo en cuenta estas características, el residuo que presenta los mejores resultados es el biochar de cáscara de naranja obtenido mediante pirólisis asistida por microondas a 800 W, alcanzando una porosidad del 80,95 %, un pH de 5,67, un contenido de carbono fijo al 27,91 % y un contenido en cenizas del 0,8 %. En este caso, el carbono fijo y el contenido en cenizas se han considerado como factores determinantes en la selección del biochar más adecuado.

Otro residuo que también muestra buenos resultados es el biochar de posos de café obtenido mediante carbonización hidrotérmica a 2 horas, con una porosidad del 95,65 %, un pH de 5,64, carbono fijo al 15,45 % y un contenido en cenizas de 0,64 %.

4.4.4 Procesos de combustión

La eficiencia del biochar como combustible depende de su poder calorífico (PCS), contenido de carbono fijo, proporción de volátiles y cenizas, y sus ratios O/C y H/C. Un biochar con valores óptimos en estos parámetros permite una combustión más eficiente y estable, con menor generación de residuos sólidos.

El PCS es un factor importante, ya que indica la cantidad de energía liberada durante la combustión. Por lo que un biochar con valores superiores a 4000 kcal/kg hacen que el biochar sea más adecuado como biocombustible [52]. En este aspecto, los ratios O/C y H/C también juegan un papel importante, ya que valores bajos indican una mayor estabilidad térmica y un mejor rendimiento energético [36].

El contenido de carbono fijo es otro aspecto relevante ya que indica una mejor capacidad de combustión prolongada [62]. Además, es importante que el biochar con un bajo contenido en cenizas para evitar la formación de residuos sólidos que puedan reducir la eficiencia del residuo.

Teniendo en cuenta estos criterios, el biochar de posos de café obtenido mediante pirólisis asistida por microondas presenta los valores más favorables, con un PCS superior a 5000 kcal/kg, ratios de O/C y H/C dentro del diagrama de Van Krevelen un contenido de carbono fijo del 18,29 % y un contenido de cenizas de 2,4 %.

Por otro lado, el biochar de cáscara de naranja obtenido mediante pirólisis asistida por microondas a 800 W también muestra buenos resultados, con un PCS superior a 4100 kcal/kg, ratios O/C y H/C dentro del diagrama de Van Krevelen, un contenido en carbono fijo del 27,91 % y un contenido en cenizas de 0,8 %. A pesar de que este biochar presenta un contenido de carbono fijo mayor, su menor PCS en comparación con los posos de café lo sitúa en una posición secundaria en términos de eficiencia energética.

5 CONCLUSIONES

En este apartado se presentan las conclusiones del estudio, destacando los resultados obtenidos en la comparación de las dos técnicas analizadas para la producción de biochar. Asimismo, se proponen líneas futuras con posibles mejoras y optimizaciones que podrían implementarse para mejorar la calidad del biochar generado.

5.1 Conclusiones

En este trabajo se han evaluado distintos métodos de obtención de biochar con el objetivo de determinar cuál es el más adecuado en función del tipo de residuo y las propiedades deseadas en el material final. A continuación, se presentan las principales conclusiones derivadas del análisis realizado:

- Los dos métodos utilizados (pirólisis asistida por microondas y carbonización hidrotermal) han mostrado buenos resultados. Considerando que la elección del método de obtención de biochar depende del tipo de residuo, se puede concluir que la pirólisis asistida por microondas a 800 W ha sido la más efectiva, en términos de tanto rendimiento como carbono fijo, seguida de la carbonización hidrotermal a 4 horas, especialmente en el caso de la cáscara de naranja y los posos de café. Por otro lado, la piel de plátano y la piel de patata han mostrado mejores resultados a menores potencias y tiempos de reacción, aunque sus resultados no son tan destacados como los de los otros residuos.
- La caracterización del biochar obtenido sugiere que la elección del método de producción debe alinearse con la aplicación final deseada. La carbonización hidrotermal es adecuada para maximizar la adsorción y la mejora de suelos, mientras que la pirólisis asistida por microondas es preferible para optimizar el poder calorífico y la estabilidad térmica del biochar. Específicamente, el biochar derivado de cáscara de naranja es ideal para adsorción, tratamiento de aguas y combustión. La piel de plátano, aunque no destaca en una aplicación específica, es útil para la enmienda de suelos y el tratamiento de aguas. Los posos de café son especialmente adecuados para procesos de adsorción y combustión, mientras que la piel de patata se recomienda principalmente para la enmienda de suelos.
- El análisis estadístico mediante ANOVA ha revelado que, en la producción de biochar, la potencia aplicada en la pirólisis asistida por microondas es el factor que más influye en las propiedades del producto final. Por su parte, el tiempo de reacción en la carbonización hidrotermal (HTC) también afecta a las características del biochar, aunque en menor medida. En contraste, el tipo de residuo utilizado no muestra una influencia significativa en las propiedades analizadas del biochar.

5.2 Líneas futuras

En el desarrollo de este trabajo, se han identificado aspectos que requieren una investigación más detallada para optimizar la producción y aplicación del biochar. A continuación, se presentan las líneas futuras de investigación, orientadas a mejorar la calidad del biochar producido.

- **Optimización de parámetros en la pirólisis asistida por microondas para la generación de biochar**

Se propone llevar a cabo un estudio detallado sobre la influencia del tiempo de reacción y la potencia aplicada en la pirólisis asistida por microondas. Por una parte, sería necesario evaluar cómo se modifica la producción de biochar al mantener constante la potencia modificando únicamente los intervalos de tiempo. Por otro lado, se debería analizar el efecto de diversas potencias aplicadas durante un intervalo de tiempo establecido. Este enfoque facilitaría identificar las condiciones óptimas para incrementar la calidad del biochar obtenido a partir de cada tipo de residuo.

- **Integración de pirólisis asistida por microondas y tratamiento en autoclave para la optimización de la producción de biochar:**

Combinar diferentes métodos de obtención de biochar con el objetivo de reducir los tiempos de procesamiento y mejorar la eficiencia en la retención del carbono fijo. Una estrategia viable sería iniciar el proceso con pirólisis asistida por microondas, aplicando este procedimiento solo durante la mitad del tiempo óptimo determinado, y posteriormente someter el material resultante a un tratamiento en autoclave.

Esta combinación permitiría evaluar si la aplicación secuencial de ambos métodos mejora la obtención de carbono fijo sin aumentar significativamente el tiempo total de procesamiento. Para ello, se emplearía siempre la potencia de microondas que haya dado los mejores resultados según el parámetro de interés, ya sea rendimiento o carbono fijo, así como el tiempo de autoclave que haya demostrado ser más eficiente.

- **Estandarización de la granulometría para la comparación y evaluación del efecto en la producción de biochar:**

Se debería incrementar la granulometría de la cáscara de naranja y los posos de café para facilitar una comparación más exacta con los demás desechos. Considerando que, en los ensayos realizados en este estudio, tanto la piel de patata como la de plátano ya fueron procesadas con un tamaño de partícula superior, esta modificación aseguraría que todos los residuos se examinarán bajo las mismas condiciones. Además, permitiría una evaluación más rigurosa si la granulometría afecta al rendimiento y la retención de carbono fijo, ofreciendo información más precisa de su influencia en la eficiencia del proceso y las características finales del biochar.

- **Activación del biochar**

Se propone activar químicamente el biochar obtenido de cáscara de naranja mediante pirólisis asistida por microondas a 800 W, dado que este residuo ha mostrado mejores resultados en términos de carbono fijo, contenido de cenizas, porosidad y pH. Este procedimiento permitiría evaluar si la activación química mejora su eficacia en el tratamiento de aguas, tal como se ha planteado en secciones anteriores.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Pérez Porto, «Residuo - Qué es, clasificación, definición y concepto», *Actualizado el 18 de octubre de 2021*, Accedido: 26 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://definicion.de/residuo/>
- [2] «Boletín oficial del Estado, número 181». 29 de julio de 2011. Accedido: 26 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/eli/es/l/2011/07/28/22>
- [3] Recytrans, «Clasificación de los residuos», Gestión de residuos - Soluciones Globales para el Reciclaje. Accedido: 27 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.recytrans.com/blog/clasificacion-de-los-residuos/>
- [4] «Residuos industriales: qué son, ejemplos, tipos, clasificación y manejo». Accedido: 30 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.ecologiaverde.com/residuos-industriales-que-son-ejemplos-tipos-clasificacion-y-manejo-2714.html#anchor_0
- [5] Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, «Residuos agrarios». 2012. [En línea]. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/images/es/Residuos%20agrarios_tcm30-193059.pdf
- [6] «Qué son los residuos hospitalarios - Colombia Verde». Accedido: 30 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://colombiaverde.com.co/ecologia/residuos/que-son-los-residuos-hospitalarios/>
- [7] Bimedica, «Qué son los residuos sanitarios y cómo se clasifican (I)», Bimedica. Accedido: 30 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.bimedica.com/soluciones-sanitarias/que-son-los-residuos-sanitarios-y-como-se-clasifican/>
- [8] AST, «Diferencias entre Residuos Peligrosos y No Peligrosos», AST Recuperaciones. Accedido: 30 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ast-recuperaciones.es/diferencias-entre-residuos-peligrosos-y-no-peligrosos/>
- [9] «Novedades de la nueva Ley 7/2022, de residuos y suelos contaminados», Fieldfisher. Accedido: 5 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.fieldfisher.com/es-es/locations/espana/actualidad/novedades-de-la-nueva-ley-7-2022-de-residuos-y-su>
- [10] Ecoembes, «Conoce cómo se clasifican los residuos  | Ecoembes Dudas del Reciclaje», Ecoembes Reduce Reutiliza y Recicla. Accedido: 28 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://reducereutilizarecicla.org/como-se-clasifican-los-residuos/>
- [11] J. de C. y León, «Definición y tipos de residuos». Accedido: 5 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://medioambiente.jcyl.es/web/es/calidad-ambiental/definicion-tipos-residuo.html>
- [12] «What a Waste». Accedido: 5 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/>

- [13] «Waste management», European Environment Agency. Accedido: 5 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/themes/waste/waste-management/waste-management>
- [14] «Informe del Banco Mundial: Los desechos a nivel mundial crecerán un 70 % para 2050, a menos que se adopten medidas urgentes», World Bank. Accedido: 5 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2018/09/20/global-waste-to-grow-by-70-percent-by-2050-unless-urgent-action-is-taken-world-bank-report>
- [15] Parlamento Europeo, «El trabajo de la UE para la gestión sostenible de residuos», p. 7, 25 de marzo de 2024.
- [16] Jefatura del Estado, «“BOE” núm. 85, de 09 de abril de 2022». [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/pdf/2022/BOE-A-2022-5809-consolidado.pdf>
- [17] admin, «Tipos de gestión de residuos: una guía completa.», Ecología Cotidiana. Accedido: 4 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://ecologiacotidiana.es/tipos-de-gestion-de-residuos-una-guia-completa/>
- [18] Maria Videgain Marco, «Producción y caracterización de biochar. Evaluación de sus efectos sobre el sistema suelo-planta microorganismos.», Zaragoza, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://zaguan.unizar.es/record/110894/files/TESIS-2022-063.pdf>
- [19] Ariadna Escalante Rebolledo, Guadalupe Pérez López, y Claudia Hidalgo Moreno, «Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo», Veracruz. [En línea]. Disponible en: <https://scielo.org.mx/pdf/tl/v34n3/2395-8030-tl-34-03-00367.pdf>
- [20] Manuel Olmo Prieto, «Efectos del biochar sobre el suelo, las características de la raíz y la producción vegetal», Córdoba. [En línea]. Disponible en: <https://helvia.uco.es/xmlui/bitstream/handle/10396/13381/2016000001398.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [21] Johannes Lehmann, Stephen Joseph, «Biochar for Environmental Management», vol. 2nd Edition, n.º 976, doi: <https://doi.org/10.4324/9780203762264>.
- [22] G. S. Rubio, «Análisis de la producción de biochar a partir de residuos ganaderos en Ecuador», [En línea]. Disponible en: https://oa.upm.es/75222/1/TFM_GANDI_SALVADOR_SUASNAVAS_RUBIO.pdf
- [23] Julieth Alejandra Acero Nítola y Mónica Gil Ramírez, «Valoración del potencial energético y de adsorción del biochar obtenido de lodos de PTAR», Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uptc.edu.co/server/api/core/bitstreams/be5c7d48-0c26-4904-bcfc-5a67009d4546/content>
- [24] Daniel Paco Abenza, «Evaluación de efectos de varios tipos de biochar en suelo y planta», Autónoma de Barcelona. [En línea]. Disponible en: https://ddd.uab.cat/pub/trerecpro/2012/hdl_2072_202695/PFC_DanielPacoAbenza.pdf
- [25] Álvarez-Murillo, «Hidrocarbonización como técnica de valorización de materiales biomásicos.», Tesis doctoral, Extremadura, 2016.
- [26] Darysnela Mendoza Fuentes y Mayra Alejandra Llorente Cuadro, «Análisis de la producción de Biochar en zonas rurales empleando tecnologías de pirólisis/gasificación», San Buenaventura (Colombia). [En línea]. Disponible en: <https://bibliotecadigital.usb.edu.co/server/api/core/bitstreams/67554fb3-37f3-42cf-9347-e28c04a27f6f/content>
- [27] Emily T. Kostas, Daniel Beneroso, y John P. Robinson, «The Application of Microwave Heating in Bioenergy: A Review on the Microwave Pre treatment and Upgrading Technologies for Biomass», Nottingham. [En línea]. Disponible en: https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/10067713/1/kostas_et_al_2017.pdf
- [28] Laura Milena Bejarano Moreno y Paola Alexandra Aguilar Díaz, «Evaluación del biochar e hidrochar como medios de captura de carbono en el suelo», Universidad de la Salle, Bogotá, 2017.
- [29] S. Pinto-Altamiranda, J. S. Aristizábal-Restrepo, M. E. González;, . D., Gutiérrez, y C. Barrera-Causil, «Influencia de los parámetros operacionales de carbonización hidrotermal asistida por

- microondas en la obtención de productos de valor energético», vol. 25, n.º 54, p. 21, 2022, doi: <https://doi.org/10.22430/22565337.2265>.
- [30] Gao, Y., Remón, J., & Matharu, A. S., «Microwave-assisted hydrothermal treatments for biomass valorisation: A critical review. Green Chemistry». 2021. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1039/d1gc00623a>
- [31] Miguel Bona Otal, «Estudio de la carbonización hidrotermal de alperujo húmedo y caracterización de los productos generados bajo diferentes condiciones de operación», Zaragoza. [En línea]. Disponible en: <https://zaguan.unizar.es/record/60594>
- [32] E. J. Albacura Chuquín, «Obtención y caracterización de Biochar a partir de cáscaras de cacao mediante pirólisis asistida por microondas», Central del Ecuador. [En línea]. Disponible en: <https://www.dspace.uce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/292ffbdce0bf42fd8ce76dbee9d7342d/content>
- [33] Anissa Khelfa, Filipe Augusto Rodrigues, Mohamed Koubaa, y Eugène Vorobiev, «Microwave-Assisted Pyrolysis of Pine Wood Sawdust Mixed with Activated Carbon for Bio-Oil and Bio-Char Production», p. 12.
- [34] Yu-Fong Huang, Pei-Te Chiueh, y Chun-Hao Shih, «Microwave pyrolysis of rice straw to produce biochar as an adsorbent for CO₂ capture», vol. 84, pp. 75-82, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.02.026>.
- [35] J.Chaparro-Garnica, M.J.Mostazo-López, D.Salinas-Torres, E.Morallón, y D.Cazorla-Amorós, «Residuos de biomasa como plataforma para obtener materiales carbonosos porosos mediante carbonización hidrotermal en presencia de H₃ PO₄», Alicante. [En línea]. Disponible en: https://www.gecarbon.org/boletines/articulos/BoletinGEC_055-art04.pdf
- [36] Estefanía Ponce Ballester, «El proceso de carbonización hidrotermal aplicado a la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos», Valencia. [En línea]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/30137/Tesina%20Estefania%20Ponce.pdf>
- [37] Jui-Chun Lin, «Integrated Thermochemical Conversion Processes for the Production of Soil Amendments and Biofuels from Agricultural Waste», Cornell. [En línea]. Disponible en: <https://ecommons.cornell.edu/server/api/core/bitstreams/9facc408-a528-4d76-9b87-56a82ef7b05c/content>
- [38] M.A. de la Rubia, E. Díaz, E. Gómez-Herrero, y J. Manzano, «Aplicación de la carbonización hidrotermal para la valorización de residuos». [En línea]. Disponible en: [aplicacion-de-la-carbonizacion-hidrotermal-para-la-valoracion-de-lodos-de-edar-y-otros-residuos.pdf](#)
- [39] G. C. Nicolás, M. Castro, y P. Rial, «Valorización de residuos orgánicos por carbonización hidrotermal».
- [40] Hualca Barahona Nathkary Saharai, «Producción De Biochar a Partir De Materia Orgánica De Heces De Vacunos Y Porcos Para La Recuperación De Aguas Contaminadas Con Metales Pesados a Nivel De Laboratorio», *Proyecto de Investigación presentado previo a la obtención del Título de Ingeniera Ambiental*, [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.utc.edu.ec/server/api/core/bitstreams/3aed9eab2ae14f93b38ee03949b522bf/content>
- [41] Julio Joaquín Virreira Flore y Oscar Alan Cristian Góngora Pereira, «Caracterización Físicoquímica De Las Cascaras De Naranja (citrus Sinensis L.) Y Pomelo (citrus Grandis), Para Obtener Bioetanol», Universidad Nacional de la Amazonía Peruana, Perú. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.unapiquitos.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12737/4258/Julio_Tesis_T%c3%a4tulo_2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [42] M. Ahmad, «Effects of pyrolysis temperature on soybean stover- and peanut shell-derived biochar properties and TCE adsorption in water», *Bioresource Technology*, ene. 2012, Accedido: 22 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/56699421/Effects_of_pyrolysis_temperature_on_soybean_stover_and_peanut_shell_derived_biochar_properties_and_TCE_adsorption_in_water

- [43] Víctor Balaguer Benlliure, «Evaluación Del Proceso De Carbonización Y Las Características Del Biochar De 16 Especies Creciendo En Plantaciones De Rápido Crecimiento En Costa Rica», Costa Rica. [En línea]. Disponible en: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/10833/evaluacion-proceso-carbonizacion-caracteristicas-biochar.pdf?sequence=1>
- [44] Evelyn Maria Nates Ocampo, «Evaluación del efecto de biochar en el suelo y la calidad de los frutos en un cultivo de uchuva», [En línea]. Disponible en: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/17900/NatesOcampoEvelynMaria2014.pdf?sequence=1>
- [45] Cristina Sumari Flores, «Caracterización Y Toxicidad Del Biochar Obtenido a Partir De La Pirólisis De Cascarilla De Arroz, Pergamino De Café Y Restos De Poda De Arándano», Facultad de ciencias ambientales, Lima, Perú. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.cientifica.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12805/2737/TL-Sumari%20C-Ext.pdf?sequence=12&isAllowed=y>
- [46] Nevis Alejandra Ruiz Márquez, «Evaluación Del Efecto De La Aplicación De Biochar En Suelos Agrícolas Basado En La Migración De Nutrientes», Nacional de Colombia. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/81468/1017248628.2022.pdf?sequence=1>
- [47] Judith Domínguez Mendoza, «Obtención de Materiales carbonosos y furanos a partir de Bagazo de agave por carbonización hidrotérmica», Centro de investigación en materiales avanzados. Departamento de estudios de posgrado. [En línea]. Disponible en: <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/2270/1/Tesis%20Judith%20Domínguez%20Materiales%20carbonosos%20y%20furanos.pdf>
- [48] Espinoza Mogollón Edson Ronaldihño, «Obtención de subproductos derivados de la carbonización hidrotermal de materiales adsorbentes derivados de residuos agroindustriales», Nacional de Tumbes. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.untumbes.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12874/63425/TESIS%20-%20ESPINOZA%20MOGOLLON.pdf?sequence=3>
- [49] Joan J. Manyà Cervelló y María Videgain Marco, «Producción Y Caracterización De Biochar Derivado De Sarmiento De Viña (vitis Vinifera). Estudio Preliminar De Su Aplicación Sobre El Desarrollo De Plantas Gramíneas», Zaragoza. [En línea]. Disponible en: <https://zaguan.unizar.es/record/64725/files/TAZ-TFG-2017-5062.pdf>
- [50] D. Hui, «Effects of Biochar Application on Soil Properties, Plant Biomass Production, and Soil Greenhouse Gas Emissions: A Mini-Review», *Agricultural Sciences*, vol. 12, n.º 3, Art. n.º 3, mar. 2021, doi: 10.4236/as.2021.123014.
- [51] Moraima Cristina Mera Aguas y Edwin Andrés Simbaña Villarreal, «Evaluación de la capacidad calorífica de biocombustible sólido a partir de residuos lignocelulósicos de café (Coffea spp) frente a leña de Espino (Vachellia macracantha) y Eucalipto (Eucalyptus globulus labill)», n.º 15, p. 7, 21 de diciembre de 2016.
- [52] Judy Amparo Macías Ortiz y Marbely Blanco Gómez, «Evaluación del poder calorífico y su relación con las propiedades fisicoquímicas de las dos especies forestales de mayor uso en las actividades domésticas en tres veredas del municipio de San José de Miranda», Industrial de Santander.
- [53] Lydia Fryda y Rianne Visser, «Evaluation of biochar from gasification and slow pyrolysis», *Agriculture*, p. 44, doi: 10.3390/agriculture5041076.
- [54] Piyanut Phuthongkhao, Kitanchalee Phasin, Purita Boonma, Rattabal Khunphonoi, Ekkachai Kanchanatip, y Totsaporn Suwannaruang, «Preparation and characterization of hydrothermally processed carbonaceous hydrochar from pulp and paper sludge waste», 11 January 2023, doi: <https://doi.org/10.1007/s13399-023-03761-5>.
- [55] Xiao Zhao, Hui Zhou, y Vineet Singh Sikarwar, «Biomass-based chemical looping technologies: the good, the bad and the future», vol. 9, p. 2017.

- [56] Leonel J. R. Nunes, Liliana M.E.F.Loureiro, y Leticia C.R.Sa, «Sugarcane Industry Waste Recovery: A Case Study Using Thermochemical Conversion Technologies to Increase Sustainability», 17 September 2020, doi: 10.3390/app10186481.
- [57] Jorge Emilio Rhenals Hoyos, «Evaluación De La Producción De Biochar Por Medio De Pirólisis Lenta De Residuos De La Agroindustria Del Maíz En Un Reactor Alotérmico», Córdoba. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unicordoba.edu.co/server/api/core/bitstreams/14cd02e2-219d-49b3-a459-c5d576fdee4f/content>
- [58] Fernando Molinés Cintora, «Producción de biochar a partir de purines», Zaragoza. [En línea]. Disponible en: <https://zaguan.unizar.es/record/48087/files/TAZ-TFG-2015-149.pdf?version=1>
- [59] Marlon Ely Eras Castillo, «Obtención de carbón mediante Carbonización Hidrotermal a partir de residuos de piña», Central de Ecuador. [En línea]. Disponible en: <https://www.dspace.uce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/39fd389f-3caf-4565-8c6c-d64e0ba2f49c/content>
- [60] Iria Benavente Ferraces, «Efectos del uso del biochar sobre el cultivo y las propiedades del suelo en ecosistemas agrícolas semiáridos», Politécnica de Madrid. [En línea]. Disponible en: https://oa.upm.es/73596/1/IRIA_BENAVENTE_FERRACES.pdf
- [61] Diana María Segura Chavarría, «Control de calidad de biocarbón para la producción de Terra Preta», Costa Rica. [En línea]. Disponible en: https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/10315/control_calidad_biocarb%C3%B3n_producci%C3%B3n_terra_preta.pdf?isAllowed=y&sequence=1&utm_
- [62] Paula Yolima Correa Castro y Clara Isabel Soto Cruz, «Tratamiento De Aguas Residuales, Implementando Carbón Activado», Medellín. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.elpoli.edu.co:8080/server/api/core/bitstreams/44193d87-ade4-4979-a1ab-577202459671/content>
- [63] Deiby Présiga-Lópe, Ainhoa Rubio-Clemente, y Juan F. Pérez, «Uso del biocarbón como material alternativo para el tratamiento de aguas residuales contaminadas», vol. 20, n.º 1, pp. 121-134, 2021, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v20n1-2021011>.
- [64] Anna Kaushik, P. Priyadharshini, S. Manimegalai, V. Palaniselvam, y K. T. Parthiban, «Biochar Production from Plant Residues: A Sustainable Approach for Carbon Sequestration and Soil Fertility Improvement», vol. 24, n.º 9, pp. 1-13, doi: <https://doi.org/10.9734/acri/2024/v24i9864>.

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, ECONÓMICAS, AMBIENTALES

Durante el desarrollo de este trabajo, se han identificado implicaciones sociales, ambientales y económicas relacionadas con la producción de biochar a partir de desechos orgánicos mediante dos procesos termoquímicos: pirólisis asistida por microondas, empleando potencias de 450 W, 600 W y 800 W, y carbonización hidrotermal, con tiempos de reacción de 2 y 4 horas. Ambos métodos representan una alternativa sostenible para la gestión de residuos y promueven la valorización de materiales orgánicos dentro de la economía circular.

Uno de los principales beneficios de la producción de biochar es su capacidad para almacenar carbono en el suelo, evitando su liberación en forma de CO₂ y contribuyendo a la mitigación del cambio climático. Su estabilidad química reduce la mineralización del carbono y prolonga su permanencia en el suelo, lo que ayuda a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, su aplicación en suelos agrícolas mejora la retención de agua y nutrientes, optimizando el crecimiento vegetal y reduciendo la necesidad de fertilizantes químicos, lo que minimiza el impacto ambiental derivado de su uso.

Otro aspecto fundamental es su capacidad de adsorción, que permite reducir la movilidad de metales pesados y otros contaminantes en el suelo y el agua. Esto convierte al biochar en un recurso valioso en la remediación ambiental, dado que promueve la recuperación de suelos degradados.

Desde el punto de vista social, la producción de biochar contribuye a la reducción de residuos destinados a vertederos, impulsando un modelo de economía circular en el que los residuos se transforman en un recurso de gran valor. En este estudio, los residuos empleados son de fácil acceso y generación continua, lo que facilita su aprovechamiento en contextos donde la gestión de residuos supone un desafío ambiental y económico. Su uso en la enmienda de suelos y la recuperación de áreas degradadas también puede mejorar la calidad de vida en zonas afectadas por la erosión y la contaminación.

En términos económicos, la elección del método de producción de biochar influye directamente en la eficiencia del proceso y en los costos operativos. La pirólisis asistida por microondas requiere potencias más elevadas y un mayor consumo energético, pero permite obtener un biochar con mayor estabilidad en menor tiempo. En cambio, la carbonización hidrotermal opera a temperaturas más bajas, lo que reduce el consumo energético, aunque requiere tiempos de reacción más prolongados. La optimización de estos parámetros en función del residuo empleado es clave para maximizar la rentabilidad del proceso y minimizar los costos de producción. Además, el biochar generado puede tener múltiples aplicaciones comerciales, desde su uso en suelos agrícolas y tratamiento de aguas hasta su aprovechamiento como biocombustible.

Este estudio confirma la posibilidad de la producción de biochar mediante pirólisis asistida por microondas y carbonización hidrotermal, proporcionando alternativas a diferentes necesidades y aplicaciones. Más allá de sus beneficios ambientales y económicos, su implementación podría representar una solución eficiente para la gestión de residuos orgánicos en la Escuela Naval Militar. La reutilización de los residuos generados en sus instalaciones mediante la producción de biochar permitiría reducir la cantidad de desechos enviados a vertederos y fomentar su aplicación en la mejora de suelos, la reducción de la erosión y el tratamiento de aguas residuales.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

Este trabajo ofrece una reflexión sobre la responsabilidad ambiental y la necesidad de adoptar enfoques sostenibles en la gestión de residuos orgánicos. La producción de biochar mediante pirólisis asistida por microondas y carbonización hidrotermal no solo representa una alternativa apta desde un punto de vista técnico, sino que también plantea implicaciones éticas y sociales.

Uno de los aspectos más relevantes es la forma en que estas tecnologías pueden contribuir a la reducción del impacto ambiental a través del aprovechamiento de residuos. La valorización de materiales orgánicos que, de otro modo, serían desechados plantea una nueva perspectiva sobre la gestión de los recursos, promoviendo una transición hacia un modelo donde los desechos sean considerados valiosos. Este enfoque no solo disminuye la contaminación, sino que también fomenta prácticas más responsables y eficientes en la administración de los recursos naturales.

Desde un punto de vista social, la implementación de estos procesos muestra la necesidad de fomentar prácticas más sostenibles en la gestión de residuos. La producción de biochar a partir de residuos generados en la Escuela Naval Militar permitiría un manejo más eficiente de los desechos orgánicos generados en sus instalaciones, promoviendo un modelo de autogestión ambiental.

A nivel ético, el aprovechamiento de los residuos orgánicos a través de procesos termoquímicos recalca la importancia de adoptar decisiones responsables respecto a la gestión de los recursos naturales. En un mundo donde el consumo excesivo y la generación de desechos siguen en aumento, fomentar prácticas que reduzcan la contaminación y aprovechen al máximo los materiales disponibles es una obligación compartida tanto por instituciones como por la sociedad en su conjunto.

Finalmente, este estudio resalta la necesidad de impulsar un cambio de mentalidad respecto a la manera en que interactuamos con los residuos y el entorno. La producción de biochar no solo aporta soluciones ambientales, sino que también refleja una visión más ética y sostenible de la gestión de los recursos. Implementar este enfoque en la Escuela Naval Militar representa una oportunidad para establecer un modelo de referencia en la gestión de residuos orgánicos, promoviendo la sostenibilidad como un valor clave dentro de la institución y sentando las bases para una comunidad más consciente y comprometida con la protección del medio ambiente.