

Transformación fisicoquímica de cisco de café, cascarilla de palma y contenido ruminal  
bovino en bioproductos de alto valor agregado

Autor:

Sergio Jonayder Muñoz Rios

Trabajo de grado para optar al título de químico

Directora:

Prof. Luz Yolanda Vargas Fiallo

Msc en química

Co-directora:

Laura Maileth Rey Hernández

Ingeniera química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ciencias

Escuela de Química

Bucaramanga

2024

**Dedicatoria**

*A mi madre, mi guía, mi primera esencia,*

*mi padre, mi roca, mi fuerza eterna.*

*A mis hermanos, fuego que aviva mi esencia,*

*A Anderson, luz en la oscuridad final.*

*A las luchas sociales, eco de esperanza, por una educación justa y sin igual.*

### **Agradecimientos**

Agradezco sinceramente a todas las personas cuyo afecto y apoyo fueron fundamentales para alcanzar este importante logro. Reconozco con gratitud no solo los esfuerzos de mis padres, sino también los de sus familias, quienes contribuyeron de manera significativa a este éxito. Expreso mi más sincero agradecimiento a la Universidad pública que me brindó una formación profesional integral y me sensibilizó ante las realidades que requieren atención en nuestro país.

Quiero extender mi reconocimiento a Industrias Acuña Ltda., así como a la alianza colaborativa en las empresas de Colbeef y Trilladora el Guane, junto con sus directivos y operarios, y especialmente a Laura Rey, quien desempeñó un papel crucial como codirectora. Me gustaría expresar un agradecimiento especial a Nelson Grimaldos, cuyo conocimiento y ayuda fueron fundamentales durante las arduas noches de pruebas; sin su colaboración, el éxito en el funcionamiento del reactor habría sido incierto. También deseo agradecer a todos los funcionarios que brindaron su apoyo en el montaje del equipo, así como en las pruebas y el soporte de este proyecto.

Las pruebas de aplicación se llevaron a cabo en SENA Tecnoparque nodo de Bucaramanga, y agradezco sinceramente la oportunidad de utilizar los equipos de microscopia electrónica de barrido, el equipo de absorción atómica y el acceso a su laboratorio en general. Especial reconocimiento quiero hacer a la ingeniera Gabriela Rodríguez González y a la microbióloga Vanessa Cañón por sus valiosos aportes en la caracterización y desarrollo experimental; su conocimiento y palabras de aliento fueron de gran importancia para mí a lo largo de este proceso.

**Tabla de contenido**

<b>1. Título</b>	<b>13</b>
<b>2. Planteamiento del problema</b>	<b>13</b>
<b>3. Hipótesis</b>	<b>18</b>
<b>4. Justificación</b>	<b>19</b>
<b>5. Objetivos</b>	<b>20</b>
<b>5.1. Objetivo General</b>	<b>20</b>
<b>5.2. Objetivos Específicos</b>	<b>20</b>
<b>Introducción</b>	<b>21</b>
<b>6. Marco teórico</b>	<b>22</b>
<b>6.1. Definición de biomasa</b>	<b>22</b>
6.1.1. Origen de la biomasa	23
6.1.2. Clasificación de la biomasa	23
<b>6.2. Procesos de conversión de biomasa en biocombustible</b>	<b>26</b>
6.2.1. Pretratamientos	27
6.2.2. Métodos de conversión de biomasa	27
<b>6.3. Biomosas de origen agropecuario</b>	<b>32</b>
6.3.1. Cisco de café (CC)	33
6.3.2. Cascarilla de palma (CP)	34
6.3.3. Contenido ruminal bovino (CRB)	36
<b>6.4. Aplicaciones</b>	<b>37</b>
6.4.1. Capacidad de sorción y filtración	38

6.4.2. Uso como combustibles sólidos	39
<b>7. Antecedentes</b>	<b>39</b>
7.1. Biocarbones utilizados en la remoción de contaminantes	39
7.2. Biocarbones como combustibles sólidos	41
<b>8. Metodología</b>	<b>43</b>
8.1. Materiales	43
8.2. Preparación de las materias primas	43
8.2.1. Determinación del porcentaje de humedad	43
8.2.2. Secado	44
8.2.3. Molienda	45
8.3. Obtención de los biocarbones	47
8.4. Caracterización de las biomásas y los biocarbones	48
8.4.1. Análisis termogravimétrico (TGA)	49
8.4.3. Análisis fisicoquímico	49
8.4.5. Microscopia electrónica de barrido (SEM)	50
8.4.6. Análisis de propiedades porosas	51
8.5. Aplicaciones	51
8.5.1. Remoción de contaminantes de un medio acuoso	51
8.5.2. Evaluación de biocarbones como combustibles sólidos	58
<b>9. Resultados y discusión</b>	<b>61</b>
9.1. Caracterización de las biomásas y los biocarbones	61
9.1.1. Biomásas	61
9.1.2. Biocarbones	69

<b>9.2. Aplicaciones</b>	<b>80</b>
9.2.1. Remoción de contaminantes de un medio acuoso	80
9.2.2. Evaluación del potencial de los biocarbones como combustibles sólidos	89
<b>10. Conclusiones</b>	<b>91</b>
<b>Referencias Bibliográficas</b>	<b>93</b>

**Índice de tablas**

<b><i>Tabla 1. Condiciones operacionales de los diferentes tipos de pirólisis</i></b>	<b><i>31</i></b>
<b><i>Tabla 2. Composición química de los residuos de aceite de palma</i></b>	<b><i>36</i></b>
<b><i>Tabla 3. Porcentaje de humedad de las materias primas</i></b>	<b><i>44</i></b>
<b><i>Tabla 4. Análisis fisicoquímico de las biomásas de partida</i></b>	<b><i>63</i></b>
<b><i>Tabla 5. Eventos térmicos de las muestras analizadas por TGA</i></b>	<b><i>67</i></b>
<b><i>Tabla 6. Área BET y propiedades porosas de las biomásas de partida</i></b>	<b><i>68</i></b>
<b><i>Tabla 7. Análisis fisicoquímico de los biocarbones</i></b>	<b><i>73</i></b>
<b><i>Tabla 8. Análisis elemental de los biocarbones</i></b>	<b><i>75</i></b>
<b><i>Tabla 9. Área BET y propiedades porosas de los biocarbones</i></b>	<b><i>76</i></b>
<b><i>Tabla 10. Poder calorífico de los biocarbones</i></b>	<b><i>89</i></b>
<b><i>Tabla 11. Combustión de los biocarbones</i></b>	<b><i>90</i></b>

**Índice de figuras**

<b>Figura 1. Anatomía del café</b>	<b>34</b>
<b>Figura 2. Representación morfológica del fruto de palma</b>	<b>35</b>
<b>Figura 3. Fenómeno de adsorción</b>	<b>38</b>
<b>Figura 4. Área de secado CRB en las instalaciones Colbeef</b>	<b>44</b>
<b>Figura 5. Proceso de molienda del cisco de café</b>	<b>45</b>
<b>Figura 6. Cascarilla de palma tamizada</b>	<b>46</b>
<b>Figura 7. Contenido ruminal bovino molido y tamizado</b>	<b>46</b>
<b>Figura 8. Reactor empleado para la obtención de los biocarbones</b>	<b>48</b>
<b>Figura 9. Elaboración de las briquetas empleadas como combustibles sólidos</b>	<b>60</b>
<b>Figura 10. Análisis del comportamiento térmico de las biomásas de partida</b>	<b>64</b>
<b>Figura 11. Isotermas de adsorción y desorción de N<sub>2</sub> de las biomásas de partida</b>	<b>69</b>
<b>Figura 12. Microscopías electrónicas de barrido de los biocarbones</b>	<b>70</b>
<b>Figura 13. Isotermas de adsorción y desorción de N<sub>2</sub> de los biocarbones</b>	<b>77</b>
<b>Figura 14. Peso perdido determinado por TGA de las biomásas y los biocarbones</b>	<b>78</b>
<b>Figura 15. Análisis del comportamiento térmico de los biocarbones</b>	<b>79</b>
<b>Figura 16. Cinética de adsorción del azul de metileno</b>	<b>81</b>
<b>Figura 17. Efecto del pH en la eficiencia de remoción del azul de metileno</b>	<b>82</b>
<b>Figura 18. Efecto de la concentración inicial de azul de metileno en su remoción</b>	<b>83</b>

**Figura 19. Efecto del tiempo de contacto en la eficiencia de remoción del plomo (II)**

**84**

**Figura 20. Efecto del pH en la remoción de  $Pb^{2+}$  \_\_\_\_\_ 85**

**Figura 21. Efecto de la masa de los biocarbones en la eficiencia de remoción de  $Pb^{2+}$**

**86**

**Figura 22. Efecto de la concentración inicial de  $Pb^{2+}$  en la eficiencia de remoción\_\_ 87**

**Figura 23. Cinética de adsorción final con todos los parámetros optimizados \_\_\_\_\_ 88**

**Glosario**

**AM:** Azul de metileno

**BET:** Método Brunauer, Emmett y Teller

**CC:** cisco de café

**CP:** cáscarilla de palma

**CRB:** contenido ruminal bovino

**CC-750:** biocarbón preparado a partir de cisco de café a 750 °C

**CP-750:** biocarbón preparado a partir de cáscarilla de palma a 750 °C

**CRB-750:** biocarbón preparado a partir contenido ruminal bovino a 750 °C

**IUPAC:** La Unión Internacional de Química Pura y Aplicada

**SEM:** Microscopia Electrónica de Barrido

**TGA:** Análisis Termogravimétrico

## Resumen

En el presente estudio, se llevó a cabo la valorización de tres tipos de residuos lignocelulósicos: cisco de café (CC), cascarilla de palma (CP) y contenido ruminal bovino (CRB), transformándolos en biocarbones mediante un proceso de pirólisis lenta a una temperatura de 750 °C. Este proceso no solo permite aprovechar de manera eficiente estos desechos, otorgándoles un valor agregado significativo, sino que también contribuye al paradigma de la economía circular, promoviendo el uso sostenible de los recursos.

Los biocarbones obtenidos, denominados según el residuo de origen y la temperatura de tratamiento (CC-750, CP-750, y CRB-750), fueron evaluados en cuanto a su capacidad para remover dos tipos de contaminantes representativos: el azul de metileno, un colorante comúnmente utilizado en la industria textil y que puede tener efectos nocivos sobre el medio ambiente y la salud humana, y el plomo, un metal pesado altamente tóxico presente en diversas fuentes de contaminación industrial. Para ello, se realizaron ensayos de adsorción, analizando tanto las cinéticas de adsorción, que describen la velocidad a la que se produce la adsorción, como las isotermas de adsorción, que indican cómo varía la cantidad de contaminante adsorbido con su concentración en la fase líquida a equilibrio, bajo condiciones de temperatura constante.

Además, se investigó el potencial de estos biocarbones como combustibles sólidos alternativos. Esta línea de investigación responde a la necesidad de encontrar fuentes de energía más sostenibles y menos perjudiciales para el medio ambiente, frente a los combustibles fósiles tradicionales.

**Palabras clave:** Biocarbones, adsorbentes, combustibles sólidos

Transformación fisicoquímica de cisco de café, cascarilla de palma y contenido ruminal bovino en bioproductos de alto valor agregado. Autor: Sergio Jonayder Muñoz Ríos. Facultad de Ciencias. Escuela de Química. Directora: Luz Yolanda Vargas Fiallo. Msc en química. Co-directora: Laura Maileth Rey Hernández. Ingeniera química.

### **Abstract**

In the present study, the valorization of three types of lignocellulosic waste was carried out: coffee cisco (CC), palm kernel shell (CP) and bovine ruminal content (CRB), transforming them into biochars through a slow pyrolysis process at 750 °C. This process not only allows this waste to be efficiently used, but also contributes to the circular economy paradigm, promoting the sustainable use of resources.

The biochars obtained, named according to the biomass and the treatment temperature (CC-750, CP-750, and CRB-750), were evaluated for their capacity to remove two types of pollutants: methylene blue, a dye used in the textile industry that exhibits harmful effects on the environment and human health, and lead, a highly toxic heavy metal present in various sources of industrial pollution. For this purpose, adsorption tests were carried out, analyzing both the adsorption kinetics, which describe the speed at which adsorption occurs, and the adsorption isotherms, which indicate how the amount of adsorbed pollutant varies with its concentration in the liquid phase. at equilibrium, under conditions of constant temperature.

Furthermore, the potential of these biochars as alternative solid fuels was investigated. This line of research responds to the need to find more sustainable energy sources that are less harmful to the environment, compared to traditional fossil fuels.

**Key words:** Biochars, adsorbents, solid fuels

Physicochemical transformation of coffee husks, palm kernell shell, and bovine ruminal content into added value bioproducts. Autor: Sergio Jonayder Muñoz Rios. Facultad de Ciencias. Escuela de Química. Director: Luz Yolanda Vargas Fiallo. MSc in chemistry. Co-director: Laura Maileth Rey Hernández. Chemical Engineer.

## **1. Título**

Transformación fisicoquímica de cisco de café, cascarilla de palma y contenido ruminal bovino en bioproductos de valor alto agregado.

## **2. Planteamiento del problema**

El incremento demográfico y el acelerado desarrollo industrial han propiciado un notable aumento exponencial en la generación de diversos tipos de residuos. La inadecuada gestión y vertido de estos desechos conlleva impactos adversos a niveles ambientales, sociales y económicos. En el contexto económico y de sostenibilidad de una nación, el sector agroalimentario adquiere un papel crítico, especialmente en aquellas naciones que tienen una marcada dependencia de la agricultura. No obstante, la industria agrícola genera significativas toneladas de residuos que, bajo los paradigmas de una economía lineal con orientación extractivista, no se aprovechan en su totalidad, siendo mayormente relegados al desecho o la incineración.

El sistema predominante de economía lineal que se fundamenta en la producción, consumo y eliminación de desechos, además de contaminar el medio ambiente da como resultado un gran desperdicio y un uso ineficiente de los recursos. Este escenario resalta la necesidad imperante de transitar hacia modelos más circulares y sostenibles, donde se maximice la utilización de estos residuos mediante prácticas avanzadas de gestión de recursos, promoviendo así la eficiencia y la responsabilidad ambiental. La Economía Circular se caracteriza como una estrategia para gestionar la circularidad, eficiencia y optimización de los recursos, destacando la utilización de residuos como materias primas para valorizarlos. Este

enfoque se sustenta principalmente en los principios de Reciclaje, Reducción y Reutilización (Manickam & Duraisamy, 2019).

La gestión de los residuos agroindustriales plantea un desafío sustancial que va más allá de la mera mitigación de la contaminación ambiental ya que también brinda la oportunidad de orientar nuestra economía nacional hacia la consecución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) Aunque en 2019 se estableció la Comisión de Alto Nivel para la implementación de la Agenda 2030 y sus ODS, cuyo propósito era coordinar, implementar y monitorear la ejecución de estos objetivos en el país, los resultados presentados por el Departamento Nacional de Planeación (DNP) en 2022 merecen atención particular. Entre los logros notables, se observa una reducción de la pobreza en un 35%, la universalización de la educación primaria y secundaria, un aumento significativo en el acceso a servicios de salud (alcanzando un 93%) y una disminución del 20% en las emisiones de gases de efecto invernadero desde el año 2000 (Departamento Nacional de Planeación, 2022).

No obstante, el informe resalta que Colombia aún se enfrenta a desafíos considerables en aspectos como la desigualdad, la violencia y, especialmente, la degradación ambiental. En este último aspecto, el informe advierte que la contaminación del suelo está emergiendo como un problema creciente en Colombia. Esta problemática tiene implicaciones directas en la contaminación de las aguas subterráneas y la polución del aire debido a la combustión de residuos repercutiendo en la salud de seres humanos y animales, generando un impacto negativo en la biodiversidad en todo el territorio colombiano (Departamento Nacional de Planeación, 2022). La agricultura, mediante prácticas como la deforestación, el uso intensivo de fertilizantes y plaguicidas, el elevado consumo de agua y la generación de residuos sin disposición responsable, se considera como una de las actividades que contribuye de manera significativa a la degradación ambiental, afectando diversos componentes del entorno.

Santander ha experimentado un destacado crecimiento económico durante el año 2022, consolidándose como el cuarto departamento con mayor contribución al Producto Interno Bruto (PIB) nacional, representando el 6,03% de la economía del país (DANE- Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2023). Este dinamismo económico encuentra su sólida base en dos sectores clave: la industria manufacturera, que aporta un 16,5% a las actividades económicas del departamento, y la agricultura, que contribuye con un 11,2% (DANE- Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2021). Cabe destacar que Santander ostenta el cuarto lugar a nivel nacional en términos de extensión de tierras dedicadas a la producción agrícola, con un total de 355921 hectáreas (DANE- Departamento Administrativo Nacional de Estadística, s. f.)

La relevancia de Santander en la producción agrícola durante 2022 se manifiesta de manera destacada en sectores específicos. En el ámbito del cultivo de palma de aceite, el departamento se posiciona como el segundo con mayor extensión de tierras dedicadas a esta plantación, totalizando 91857 hectáreas, según información proporcionada por Fedepalma (Fedepalma., s. f.). Por otro lado, en el cultivo de café, de acuerdo con la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, Santander se ubica en la sexta posición a nivel nacional en términos de hectáreas cultivadas, con un total de 54320 hectáreas (Dirección de Investigaciones Económicas - FNC, 2022). Durante el transcurso del año 2022, las actividades pecuarias en el territorio nacional experimentaron un incremento del 4,7% en la población bovina. Este aumento posicionó al departamento como el sexto a nivel nacional en cantidad de bovinos, alcanzando un total de 1681648 individuos, lo que representa un 5,7% del censo bovino total a nivel país (ICA, 2022).

Al examinar la extensión de tierra destinada a actividades agropecuarias en el departamento y la relación entre estas actividades con la degradación ambiental, se evidencia

la importancia de contemplar estrategias para mitigar el impacto ambiental causado por estas industrias. Una solución viable radica en la gestión de residuos generados por dichas actividades en la región. A pesar de que actualmente se someten a tratamiento estos desechos, es crucial orientarse hacia un manejo que no solo sea ambientalmente responsable, sino también acorde con los principios de la economía circular. Esto implica la posibilidad de incorporar estos residuos en cadenas de valor agregado, abriendo nuevas oportunidades para una gestión más sostenible y beneficiosa tanto desde el punto de vista económico como ambiental.

Es evidente que los residuos o subproductos se generan en cualquier proceso productivo y con frecuencia no se les otorga utilidad posterior como materia prima para la cadena productiva. A pesar de los considerables volúmenes de residuos sólidos orgánicos generados en el país y del potencial de aprovechamiento de éstos, aún no se cuenta con una estimación ni caracterización consolidada de su producción, como tampoco es conocida la cantidad de residuos aprovechados. La composición fisicoquímica y el potencial energético de la biomasa son aspectos cruciales a considerar al evaluar su uso en una posible tecnología. Las características químicas y físicas de la biomasa determinan el tipo producto que se puede obtener.

Actualmente La MiPyMe Trilladora El Guane en su planta industrial alcanza una producción de 200 toneladas anuales de cascarilla de café (Cisco), con una proyección de incremento del 10% anual, Este volumen considerable de residuos se caracteriza por ser altamente contaminante, demandando considerables cantidades de oxígeno para su degradación. Además, el contenido de taninos, cafeína y otros compuestos fenólicos presentes en esta biomasa les conceden una naturaleza tóxica al degradarse. En el caso de Colbeef S.A, su planta de procesamiento genera alrededor de 400 toneladas mensuales de rumen, lodos y

estiércol. Sin embargo, solo se logra comercializar entre un 10% y un 20% del material crudo, lo que obliga a la empresa a realizar inversiones significativas para el acondicionamiento del espacio físico, el tratamiento y transporte de esta biomasa. Por otra parte, Industrias Acuña Ltda., una empresa metalmecánica especializada en la fabricación de equipos de extracción para la industria del aceite de palma se esfuerza por proporcionar soluciones ambientales a los desechos generados por sus clientes.

Dentro de las estrategias destinadas a gestionar los residuos agroindustriales, los tratamientos térmicos, y más específicamente los tratamientos pirolíticos, se destacan como alternativas prometedoras. En este proceso, la biomasa se somete a condiciones controladas de alta temperatura en ausencia de oxígeno, generando productos de valor agregado. Entre estos productos se incluyen gases, biocombustibles y biocarbones, los cuales no solo representan una forma de aprovechamiento sostenible de los residuos, sino que también contribuyen a la producción de energía y productos útiles en diversas aplicaciones industriales. (Li et al., 2022).

En este contexto, el proyecto “Transformación fisicoquímica de cisco de café, cascarilla de palma y contenido ruminal bovino en bioproductos de alto valor agregado” plantea la utilización estratégica de residuos agroindustriales, como la cáscara de palma, el contenido ruminal bovino y el cisco de café, generados en el departamento de Santander por las principales actividades agrícolas, con el objetivo de llevar a cabo una evaluación detallada de los biocarbones producidos a partir de cada una de estas biomásas. El propósito de esta evaluación radica en identificar y comprender sus aplicaciones potenciales, tanto como adsorbentes en procesos de purificación de agua como combustibles sólidos. Estos biocarbones no solo pueden proporcionar soluciones a los desafíos asociados con la generación de residuos, sino que también presentan la oportunidad de contribuir al desarrollo de la economía local mediante la creación de productos valiosos y sostenibles. añadiéndoles un valor agregado e

integrándolos nuevamente a la cadena productiva de manera sostenible en atención a los principios de la Economía Circular y los ODS.

### **3. Hipótesis**

Dada la considerable cantidad de residuos orgánicos provenientes de la industria agrícola en Colombia y tomando en consideración la experiencia en soluciones de ingeniería proporcionada por INAL, así como la relevancia de las empresas Trilladora El Guane y Colbeef S.A.S en sus respectivos sectores, la colaboración entre estos actores se erige como una oportunidad para llevar a cabo una transformación eficiente de la biomasa residual en bioproductos de valor agregado. Esta sinergia busca no solo impulsar la sostenibilidad y la competitividad empresarial sino también mitigar la contaminación ambiental en la región de Santander. Este proceso de transformación se orientará siguiendo los principios de la Economía Circular, generando impactos positivos en términos económicos, tecnológicos y ambientales.

En este marco, se formulan dos hipótesis. La primera, conocida como la hipótesis nula, postula que no hay una diferencia significativa en la eficiencia de los biocarbones como medios filtrantes y en su desempeño como biocombustibles sólidos. La segunda hipótesis, denominada hipótesis alternativa, plantea que existe una diferencia significativa en la eficiencia de los biocarbones tanto como medios filtrantes como biocombustibles sólidos.

Para evaluar la validez de estas hipótesis, se aplicará el enfoque estadístico del análisis de varianza (ANOVA), una técnica diseñada para comparar las medias de dos o más grupos y determinar si existen diferencias significativas entre ellos. Este método permitirá una evaluación objetiva de la eficiencia de los biocarbones en sus diversas aplicaciones, ofreciendo

así una base sólida para la toma de decisiones en el desarrollo y optimización de los procesos de transformación de biomasa residual en la región de Santander

#### **4. Justificación**

Este proyecto se llevó cabo debido a la creciente preocupación por el impacto medio ambiental derivado de la generación de residuos agroindustriales generados por tres empresas Santandereanas. En este contexto, se busca emplear tratamientos térmicos eficientes para su transformación en bioproductos de alto valor agregado. Esta aproximación no solo aborda cuestiones ambientales al convertir los residuos en recursos valiosos, sino que también promueve la competitividad empresarial y genera impactos positivos en términos económicos, tecnológicos y ambientales en la región de Santander.

Además de buscar una gestión ambientalmente amigable de estos residuos, se busca evaluar estos productos como posibles nuevas líneas de mercado para las empresas involucradas. Asimismo, se busca implementar un tratamiento que mitigue los impactos ambientales negativos de estos residuos, lo que está alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Esto también abriría nuevas oportunidades de mercado, revalorizando estos residuos y generando impactos positivos en las economías locales.

La obtención de biocarbones a partir de tres biomasa individuales permitirá comprender sus propiedades y características fisicoquímicas, lo que puede contribuir al entendimiento de su comportamiento. Actualmente, el contenido ruminal bovino se utiliza ampliamente como compost, pero no existen estudios sobre la caracterización de los biocarbones obtenidos de esta biomasa ni sobre sus aplicaciones, como combustibles sólidos y medios filtrantes.

## 5. Objetivos

### 5.1. Objetivo General

Emplear un proceso termoquímico de transformación de biomasas agroindustriales para la obtención de productos de alto valor agregado para su aplicación en remediación ambiental y bioenergía.

### 5.2. Objetivos Específicos

5.2.1. Obtener biocarbones a partir de tres materias primas agroindustriales y estudiar sus propiedades fisicoquímicas a través de diferentes de caracterización microscópicas, espectroscópicas y térmicas .

5.2.2. Evaluar la capacidad de remoción de azul de metileno y plomo utilizando los biocarbones previamente preparados variando el pH del medio y la concentración de los sorbatos.

5.2.3. Estudiar la capacidad calorífica de los biocarbones para aplicarlos como potenciales biocombustibles.

## Introducción

El vertiginoso crecimiento poblacional experimentado en las últimas décadas ha dado lugar a un notable aumento en la demanda de bienes y servicios, generando desafíos medioambientales, económicos y sociales. En este contexto, diversos sectores están buscando activamente un equilibrio entre consideraciones ambientales y económicas, incorporando los pilares de la economía circular para lograr un uso más eficiente, responsable y efectivo de los recursos.

La industria agroalimentaria, predominantemente guiada por el modelo de extracción, producción, consumo y eliminación, contribuye con la generación de aproximadamente 1200 millones de toneladas de desechos durante las operaciones de cosecha o sacrificio, según datos de WWF. Este enfoque ineficaz en el manejo de los residuos desaprovecha el potencial que exhibe la biomasa como un recurso valioso que puede ser aplicado en diversas áreas.

La gestión de los residuos agroindustriales no solo trata de mitigar la contaminación ambiental; también representa una oportunidad para alinear la economía nacional con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). A pesar de los esfuerzos realizados por Colombia desde 2019 para cumplir con estos objetivos, los resultados no han sido satisfactorios, y la degradación de los suelos continúa en aumento.

El sector agroindustrial, influenciado por el uso de plaguicidas, la deforestación y un manejo inadecuado de los residuos, tiene un impacto directo en problemáticas de índole ambiental, social y económico.. Santander, como destacado participante en la economía nacional, se encuentra ante desafíos ambientales significativos en algunos de sus cultivos predominantes, como el cultivo de palma de aceite, café y las operaciones de beneficio bovino. El aumento en el uso de los recursos naturales del departamento plantea desafíos que entrelazan

intereses económicos y ambientales. En este contexto, es imperativo proponer estrategias que no solo mitiguen la contaminación causada por los residuos, sino que también integren principios de economía circular para transformar estas biomásas que suelen considerarse residuos en nuevos productos con valor agregado.

En este proyecto, se presenta como una alternativa innovadora la conversión de tres residuos agroindustriales específicos: cascarilla de palma, cisco de café y contenido ruminal bovino, en biocarbones mediante pirólisis. Esta propuesta no solo se enfoca en la gestión de residuos, sino que también sugiere la utilización de estos biocarbones, los cuales serán evaluados como adsorbentes y biocombustibles sólidos. De esta forma, se contribuirá de manera significativa a la implementación de soluciones sostenibles frente a la problemática ambiental del departamento.

## **6. Marco teórico**

### **6.1. Definición de biomasa**

La biomasa se refiere a la materia orgánica que se origina a partir de procesos biológicos, ya sean naturales o inducidos. Esta materia orgánica abarca una amplia variedad de sustancias de origen vegetal o animal, incluyendo los productos resultantes de su descomposición. Esta definición engloba de manera específica los restos generados por actividades agrícolas, ganaderas y forestales (La Cal Herrera, 2020). La capacidad de la biomasa para almacenar energía se origina en la compleja red de enlaces moleculares que caracteriza a sus componentes. Este proceso fundamental es el resultado directo de la fotosíntesis, una de las principales vías metabólicas que ocurre en plantas, algas y algunas bacterias. La capacidad de almacenamiento de energía de la biomasa se encuentra en estos

enlaces químicos, que contienen la energía capturada durante el proceso fotosintético (Ábrego Garrués, 2010). Por ende, si definimos a la biomasa en contexto energético, se puede denominar como “una fuente de energía de tipo renovable generada a partir de materia prima de tipo biomásico”. La capacidad de la biomasa para almacenar y liberar energía de manera eficiente la posiciona como una herramienta estratégica en la búsqueda de soluciones innovadoras para las demandas energéticas actuales y futuras (Aracil, 2015).

### ***6.1.1. Origen de la biomasa***

La biomasa puede originarse de forma espontánea en la naturaleza o ser el resultado directo de la actividad humana. La energía almacenada en la biomasa tiene su origen en el sol a través de la fotosíntesis, que actúa como un mecanismo transformador que convierte la energía luminosa del sol en energía química almacenada en las moléculas orgánicas de los seres vivos. Durante la fotosíntesis, los cloroplastos, estructuras celulares especializadas, producen clorofila, un pigmento que capta la energía solar y la convierte en energía química. Uno de los aspectos más significativos de la biomasa aprovechable se encuentra en los residuos generados por la industria agrícola. En este contexto, los desechos de procesos pueden constituir entre el 20% y el 40% de la biomasa total, mientras que los residuos de campo tienen el potencial de representar hasta un 60% (Biomass Users Network (BUN-CA), 2022).

### ***6.1.2. Clasificación de la biomasa***

La clasificación de la biomasa es crucial para diseñar sistemas de aprovechamiento eficientes y sostenibles. La biomasa se categoriza en función de su origen, estado físico y aplicaciones específicas. La clasificación energética de la biomasa se estructura en generaciones que reflejan la evolución y sofisticación de los procesos de producción de biocombustibles. La primera generación incluye cultivos de granos destinados principalmente a la producción de energía. Alrededor de 350 cultivos oleaginosos han sido identificados como

potenciales fuentes para la generación de biodiésel. En contraste, la segunda generación abarca biomasa secundaria o residual, que proviene de subproductos agrícolas, forestales e industriales y se transforma en biocombustibles. La tercera generación comprende cultivos diseñados o modificados genéticamente para obtener materias primas más eficientes como las algas. Los biocombustibles derivados de algas son reconocidos como una fuente de energía alternativa que presenta viabilidad técnica, particularmente dentro del marco de los biocombustibles de tercera generación. Este enfoque revolucionario se basa en la capacidad única de las algas para acumular grandes cantidades de aceites y lípidos, convirtiéndolas en una materia prima altamente eficiente para la producción de biocombustibles. Finalmente, la cuarta generación implica la integración de energía con tecnologías de captura de carbono a nivel de materia prima. Los biocombustibles de cuarta generación se elaboran mediante bacterias que han sido genéticamente modificadas. Estas bacterias utilizan  $\text{CO}_2$  u otras fuentes de carbono para la producción de biocombustibles. A diferencia de las generaciones anteriores, donde las bacterias y organismos genéticamente modificados se empleaban como insumos o para ejecutar ciertas etapas del proceso, en la cuarta generación, las bacterias desempeñan un papel integral, llevando a cabo la totalidad del proceso de producción de los biocombustibles. (Regúnaga et al., 2008).

Cabe mencionar que la biomasa se compone predominantemente de tres elementos primarios: carbono, oxígeno e hidrógeno, que en conjunto representan aproximadamente el 95%. Además, se encuentran trazas de nitrógeno y azufre en proporciones reducidas, derivados de los residuos de proteínas presentes en los protoplastos durante las fases iniciales del desarrollo celular (Hell, 1997). Adicionalmente, se realiza otra clasificación basada en los componentes estructurales, que comprende la biomasa lignocelulósica, la amilácea, la

azucarada y la oleaginosa. Estas últimas tres clasificaciones se utilizan extensamente en la producción de biocombustibles líquidos y biocarburantes.

**Biomasa amilácea o inulínica:** se distingue por su elevado contenido de polisacáridos de reserva, tales como el almidón o la inulina. Ejemplos notorios de esta categoría incluyen cereales, raíces y tubérculos, siendo estos últimos fundamentales en la producción de biomasa debido a su riqueza en compuestos amiláceos.

**Biomasa azucarada:** su composición principal radica en azúcares, ya sean monosacáridos o disacáridos, destacando la glucosa. Frutas, hortalizas y plantas tropicales son ejemplos representativos de esta clase, contribuyendo significativamente a la obtención de biomasa con un alto contenido de azúcares aprovechables.

**Biomasa oleaginosa:** se caracteriza por su rica composición en lípidos, destacando la presencia de aceites y gomas como componentes fundamentales. Ejemplos preeminentes de esta categoría engloban las semillas y las frutas oleaginosas, que representan valiosas fuentes de biomasa con un alto contenido de lípidos beneficiosos para diversas aplicaciones industriales y sostenibles.

La biomasa lignocelulósica constituye un tipo particular de biomasa, caracterizada por la abundancia de componentes fundamentales como la celulosa, hemicelulosa y lignina. La complejidad y versatilidad de estos elementos la convierten en un recurso clave para diversas aplicaciones industriales y sostenibles. A continuación, se profundizará en las características y potenciales usos de la biomasa lignocelulósica.

La celulosa, una macromolécula polisacárida, se conforma mediante unidades de D-glucosa conectadas por enlaces  $\beta$  1,4-glucosídicos que se organizan en cadenas lineales semicristalinas (Ábrego Garrués, 2010), Como componente mayoritario en las plantas ,la

celulosa constituye una parte esencial de las paredes celulares vegetales. La glucosa presente en la celulosa adopta la configuración D-pirano y se une a través de enlaces glucosídicos, los cuales, aunque no son demasiado fuertes, tienden a degradarse en condiciones ácidas o de alta temperatura (S. Wang & Luo, 2017) . La hemicelulosa se considera un heteropolímero de cadena corta la cual se compone de dos a cuatro azúcares diferentes A diferencia de la celulosa, la hemicelulosa presenta una estructura amorfa y mayor solubilidad. Una de sus funciones principales es actuar como intermediario entre la celulosa y la lignina en las paredes celulares vegetales. Su conexión con la celulosa depende en gran medida de las fuerzas de Van der Waals, mientras que su unión con la lignina se establece a través de enlaces covalentes (S. Wang & Luo, 2017). La lignina, constituyente minoritario en este conjunto, desempeña un papel esencial en las paredes celulares de las plantas al ocupar los espacios intermedios entre los compuestos de celulosa, hemicelulosa y pectina que conforman dichas estructuras. Se clasifica como una macromolécula aromática, hidrofóbica y reticulada, confiriéndole propiedades únicas en el contexto de las paredes celulares vegetales Establece una unión covalente con la hemicelulosa, aportando rigidez a la arquitectura de la planta. La estructura de la lignina se caracteriza por su naturaleza amorfa y compleja, lo que la hace aún poco comprendida. (Speight, 2020).

## **6.2. Procesos de conversión de biomasa en biocombustible**

La transformación de biomasa en energía puede llevarse a cabo mediante diversos métodos, siendo notables dos enfoques específicos: la conversión biotecnológica y la termoquímica. Sin embargo, es crucial destacar que, debido a la variabilidad intrínseca de la biomasa lignocelulósica, con frecuencia se requiere la implementación de pretratamientos para mejorar sus propiedades físicas, tales como el contenido de humedad y la granulometría. Esto se realiza con el propósito de facilitar su utilización como fuente de energía.

### **6.2.1. Pretratamientos**

6.2.1.1. Reducción de humedad. La humedad en los biocombustibles es un factor determinante afectando su calidad. Para garantizar un rendimiento óptimo como fuente de energía, resulta fundamental que el contenido de humedad no exceda el 30%. Valores superiores pueden acarrear complicaciones económicas, como costos de transporte más elevados debido al aumento de peso de la biomasa. Asimismo, niveles elevados de humedad impactan negativamente en el proceso, ya que una parte del calor generado se disipa en la evaporación del agua, disminuyendo los rendimientos de conversión. El secado puede llevarse a cabo de manera natural al exponer el material a un entorno de baja humedad y condiciones de lluvia mínimas (Ábrego Garrués, 2010).

6.2.1.2. Reducción granulométrica. La reducción granulométrica persigue disminuir las dimensiones de la biomasa, logrando así un aumento en su densidad aparente y en la superficie de contacto del material. Este tratamiento se vuelve especialmente beneficioso en los procesos de molienda, buscando obtener productos densificados como pellets o briquetas (Ábrego Garrués, 2010). Asimismo, disminuye el índice de cristalinidad y el grado de polimerización de la celulosa (Pabón, I. & Ospina, L., 2009), haciéndola más susceptible a la descomposición termoquímica, lo que mejora la eficiencia del proceso.

### **6.2.2. Métodos de conversión de biomasa**

6.2.2.1. Transformación biotecnológica. Se emplean agentes biológicos para degradar los componentes lignocelulósicos. Este enfoque combina técnicas de pretratamiento con hidrólisis enzimática, utilizando pulpas de biomasa obtenidas mediante diversos métodos, como tratamientos ácidos, alcalinos, disolventes orgánicos o basados en agua. El objetivo es exponer la celulosa y la hemicelulosa para su subsiguiente hidrólisis enzimática. En la hidrólisis enzimática, las enzimas celulasas descomponen las microfibrillas celulósicas en

diversos carbohidratos. Esta técnica se utiliza, por ejemplo, para fermentar los azúcares de seis carbonos y producir etanol (Speight, 2020).

**6.2.2.2. Transformaciones termoquímicas.** Son el conjunto de técnicas termoquímicas en donde se produce una descomposición térmica del material lignocelulósico en productos que incluyen agua, biocarbones, biocrudos y gases de síntesis, como metano, monóxido de carbono y dióxido de carbono (Pandey, 2011). Su descomposición involucra diversos mecanismos de transformación que incluyen deshidratación, despolimerización, descarboxilación, condensación y formación del material carbonoso. Entre los tratamientos termoquímicos más investigados se encuentran la combustión, la gasificación, la carbonización hidrotermal y la pirólisis.

**6.2.2.2.1. Combustión.** Es un proceso exotérmico que se produce cuando un combustible se mezcla con oxígeno en un entorno adecuado. Este proceso genera calor y provoca la descomposición del material lignocelulósico. La generación de calor se debe a una reacción de oxidación en la que el carbono, hidrógeno, oxígeno, azufre y nitrógeno presentes en la biomasa reaccionan con el aire (Pandey, 2011). La energía térmica resultante alcanza temperaturas moderadamente altas, generalmente entre 800°C y 1600°C, lo que la convierte en la base de la producción de energía eléctrica en todo el mundo. De hecho, la combustión directa representa aproximadamente el 90% de la producción global de energía a partir de biomasa (Brown, 2019).

No obstante, una limitación inherente a este proceso es la evaporación del agua (proceso endotérmico), atribuible a elevadas tasas de humedad presentes en las muestras. Esta característica incide negativamente en el valor calorífico de los productos finales, lo que se traduce en la predominancia de gases con bajo poder energético en la mezcla resultante, tales como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), vapor de agua (H<sub>2</sub>O) y nitrógeno (N<sub>2</sub>) (Speight, 2020).

**6.2.2.2.2. Gasificación.** Consiste en la combustión parcial de biomasa bajo condiciones de alta temperatura entre 700°C a 1000°C, generando una mezcla de gases comburentes para producir energía eléctrica (Brown, 2019). La cantidad de material volátil en la biomasa influye en su facilidad de gasificación. Una ventaja de la gasificación es que el gas de síntesis es altamente versátil, pudiendo ser empleado en una desde la generación de energía en motores adaptados para gas hasta su uso como sustituto del gasóleo en diversas aplicaciones industriales. (Ábrego Garrués, 2010).

**6.2.2.2.3. Pirólisis.** Es un proceso termoquímico mediante el cual la biomasa se descompone térmicamente en un ambiente con escaso o nulo oxígeno. Este método se puede considerar como una fase preliminar de otros procesos como la gasificación o la combustión, actuando esencialmente como una forma de incineración parcial (Brown, 2019; Seoáñez Calvo, 2013). Durante la reacción de pirólisis, se produce una serie de subproductos: una fracción gaseosa, compuesta principalmente por metano, hidrógeno, monóxido de carbono y dióxido de carbono; una fracción líquida, conocida como bioaceite, que contiene diversos compuestos orgánicos; y finalmente, un residuo sólido denominado biocarbón, que constituye la porción no volátil de la biomasa (Ábrego Garrués, 2010).

El proceso de pirólisis de la biomasa se puede dividir en cuatro etapas distintas. En primer lugar, la etapa de deshidratación, que ocurre alrededor de los 100°C, implica la absorción de calor por parte de la biomasa y la liberación de agua, con cambios mínimos en su estructura química (S. Wang & Luo, 2017).

La fase siguiente, denominada pre-pirólisis, se lleva a cabo en el intervalo de temperaturas comprendido entre 120°C y 220°C. Durante este proceso, se produce una transformación notable en la estructura química de la biomasa. Esto se debe a la descomposición de compuestos inestables, como la hemicelulosa, debido a reordenamientos

internos causados por la ruptura de enlaces químicos, la formación de radicales libres y grupos carbonilos. Esta descomposición conlleva la generación de pequeñas moléculas como CO, CO<sub>2</sub> y CH<sub>3</sub>COOH, así como la formación de ácidos y alcoholes. Además, la lignina comienza a perder peso debido a su descomposición, y se produce una transición en la estructura cristalina de la celulosa, conocida como la transición vítrea (Pandey, 2011; Seoáñez Calvo, 2013; S. Wang & Luo, 2017).

La tercera etapa, que corresponde a la fase principal de la pirólisis y se desarrolla en el rango de temperaturas de 250°C a 500°C, es donde se produce una descomposición sólida significativa de la biomasa (Pandey, 2011). En este punto, se observa la mayor pérdida de peso debido a la generación de macromoléculas condensables. Es importante destacar que, en el intervalo de temperaturas entre 260°C y 280°C, se produce la formación de hidrocarburos líquidos, lo que provoca un aumento adicional en la temperatura debido a su naturaleza exotérmica (Seoáñez Calvo, 2013).

La etapa final, que se da a temperaturas superiores a los 500°C, implica la desvolatilización continua del carbono debido a la ruptura de enlaces C-H y C-O (Pandey, 2011). Es fundamental destacar que el comportamiento de la pirólisis de la biomasa puede variar significativamente entre diferentes tipos de biomasa, debido a las variaciones en los porcentajes de hemicelulosa, lignina y celulosa presentes en cada una. Sin embargo, esta descripción proporciona una aproximación general de los eventos que tienen lugar durante el proceso de pirólisis de la biomasa (S. Wang & Luo, 2017).

Los procesos de pirólisis se dividen en categorías según las temperaturas de operación, distinguiéndose en pirólisis baja (400°C-600°C), pirólisis media (600°C-1200°C) y pirólisis alta (1200°C-2000°C) (Seoáñez Calvo, 2013). Sin embargo, estos procesos también se pueden

clasificar en pirólisis lenta, intermedia y rápida. La tabla 1 resume algunos parámetros característicos de cada una de estas.

La pirólisis lenta se caracteriza por bajas tasas de calentamientos, tiempos de residencia altas y bajas temperaturas (Fang et al., 2020). Sin embargo diversos autores difieren de esta última idea y amplían este rango hasta los 700°C (Danesh et al., 2023). Los prolongados tiempos de residencia lo que buscan es garantizar la recombinación de los volátiles en el biocarbón maximizando así su rendimiento (Gupta & Mondal, 2022). La pirólisis intermedia se caracteriza por tasas de calentamiento típicamente entre los 200-300°C/min. Estas condiciones conducen a menos formación de alquitranes ya que las reacciones químicas que acá se darán son más controladas (Hornung, 2014).

Por último, la pirólisis rápida se distingue por su aplicación de tiempos de residencia reducidos, elevadas temperaturas y rápidas tasas de calentamiento, siendo su objetivo principal la generación de bio-oil. La alta velocidad de calentamiento minimiza la descomposición excesiva de los vapores y evita la formación descontrolada de moléculas más pequeñas, lo que podría afectar negativamente la calidad del bio-oil producido. La brevedad de los tiempos de residencia permite un control preciso sobre la fragmentación molecular, favoreciendo la obtención de un producto final más homogéneo y de mayor calidad (Brown, 2019).

**Tabla 1.**

Condiciones operacionales de los diferentes tipos de pirólisis

<b>Conversión termoquímica</b>	<b>Pirólisis lenta</b>	<b>Pirólisis intermedia</b>	<b>Pirólisis rápida</b>
<b>Temperatura (°C)</b>	350–700	400–600	750–1000
<b>Tasa de calentamiento (°C/min)</b>	<10	>200	>1000
<b>Aireación</b>	Libre de oxígeno o limitado	Libre de oxígeno	Libre de oxígeno

<b>Tiempo de residencia (min)</b>	>60	~0,02	~0,04
<b>Producto mayoritario</b>	Biocarbón	Bio-oil	Bio-oil
<b>Rendimiento de biocarbón (%)</b>	30–55	10–26	37
<b>Contenido de carbón (%)</b>	95	74	85
<b>Subproductos</b>	Bio-aceite-gas combustible	Combustible Gas	-

---

Adaptación de (Danesh et al., 2023).

### 6.3. Biomásas de origen agropecuario

La industria agrícola es un sector altamente diversificado que produce una amplia variedad de residuos aprovechables, los cuales presentan una composición heterogénea. Los residuos agrícola según las Naciones Unidas (UN), se define como “los residuos producidos como resultado de varias operaciones agrícolas incluyendo el estiércol y otros desechos de granjas, instalaciones avícolas y mataderos; los desechos de la cosecha, el escurrimiento de fertilizantes de los campos, los pesticidas que ingresan al agua, el aire o el suelo, y la sal y el sedimento drenados de los campos” (Nations Unies, 1997).

La composición de estos se caracteriza por estar conformada principalmente por un 95% de carbohidratos, lignina, lípidos y proteínas, mientras que el 5% restante engloba pigmentos, vitaminas, enzimas y aceites esenciales. Esta proporción precisa refleja la complejidad y diversidad de los componentes presentes en la muestra, subrayando la riqueza de la matriz orgánica analizada (González Salcedo et al., 2021).

Los residuos en la producción agrícola provienen en su mayoría de actividades de cosecha en los cuales se encuentran residuos de material sobrante como cáscaras, que contienen pectinas, ácidos grasos, esencias y colorantes; antioxidantes y almidones. En la postcosecha también se generan residuos asociados a la valorización de las materias primas, tal es el caso del café, donde desde su cosecha hasta la obtención del café molido se generan residuos como

piel, pulpa, pergamino, entre otros (González Salcedo et al., 2021). Por otro lado, los desechos de la industria ganadera pueden ser sólidos, como el estiércol; gases como  $\text{NH}_4$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ; los líquidos, tales como la sangre, la orina y el contenido ruminal, en conjunto representan entre el 75% y el 95% de los desechos totales generados por esta industria (Sze Ki Lin et al., 2021). La disponibilidad de residuos de la industria agropecuaria asciende a los 1010 Mt, que equivalen a  $47 \times 10^{18}$  J (Ghatak, 2011), lo que la hace un atractivo como potencial fuente de energía renovable.

A continuación, se describirán tres residuos agroindustriales con un alto potencial debido a su abundante producción en el territorio de Santander.

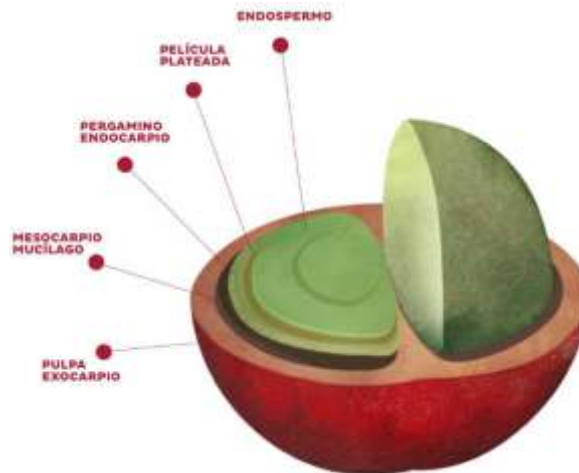
### **6.3.1. *Cisco de café (CC)***

La industria del café hace uso de tan solo un 5% del peso del fruto para la preparación de una taza de café, sin embargo, el restante 95% está compuesto por material lignocelulósico. La cereza de café está constituida por diferentes capas como se observa en la figura 1.

La más externa, la pulpa o exocarpio representa el 29% en peso y mayoritariamente se encuentran componentes como taninos, pectinas, azúcares reductores, azúcares no reductores y cafeína (González Salcedo et al., 2021). Este residuo se genera al despojar al fruto de su endocarpio, separando así la pulpa del mucílago. En la etapa de despulpado, el mucílago, que representa el 14.85% del peso total, queda adherido al pergamino. Posteriormente, este mucílago se desprenderá tras sufrir fermentaciones ácidas y alcohólicas. A continuación, se encuentran el endocarpio del fruto o cisco de café y la película plateada, que se obtienen en el proceso de trilla y representan el 20% del peso total. La composición del pergamino está constituido mayoritariamente de celulosa (40-49%), hemicelulosa (25-32%) y lignina (33-35%) haciendo a este una fuente aprovechable de material lignocelulósico (El café, 2022).

**Figura 1.**

Anatomía del café



Tomado de: Federación Nacional de Cafeteros de Colombia.(Federacion Cafetera de Colombia, s. f.)

### 6.3.2. Cascarilla de palma (CP)

El proceso de transformación del fruto de la palma de aceite en aceites vegetales es una cadena de producción compleja y extensa, durante la cual se generan diversos residuos en diferentes etapas, tanto en la cosecha como en los procesos subsecuentes al procesamiento inicial del fruto, especialmente en las plantas de beneficio. Estos residuos, derivados de cada fase del proceso, presentan un amplio espectro de composiciones y potenciales usos, reflejando la complejidad inherente al manejo y aprovechamiento de subproductos en la industria del aceite de palma.

La Figura 2 ofrece una ilustración detallada de la morfología del fruto de la palma de aceite, permitiendo una apreciación visual de las distintas partes que conforman el fruto. Esta representación es crucial para entender la distribución de los componentes que serán transformados en productos valiosos o en residuos que requieren gestión adecuada.

Uno de los primeros residuos que se observan en la industria de la palma son los racimos de fruto vacío, cuando se desprenden de los racimos de fruto fresco. En el proceso de prensado

del fruto, se obtiene una torta que contiene las fibras del mesocarpio y la nuez. Luego, las nueces se trituran para separar la almendra del cuesco (endocarpio). La generación de residuos por cada tonelada de aceite de palma crudo varía de la siguiente manera:

Racimos de fruto vacíos: 0.32-0.42 toneladas.

Fibra: 0,32-0,5 toneladas.

Cuesco: 0,13-0,4 toneladas.

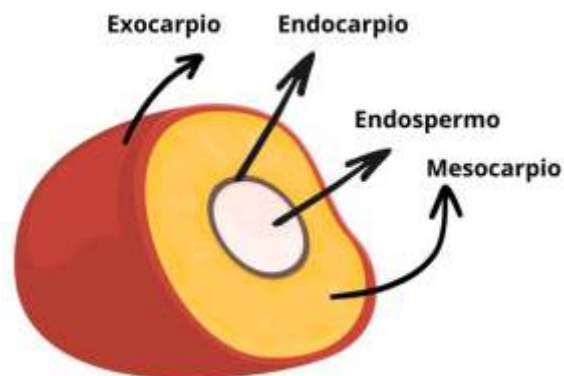
Torta de palmiste: 0,06 toneladas.

Aceite de palmiste: 0,10-0,15 toneladas.

Es importante destacar que estos residuos se producen en las plantas de procesamiento. Además, los residuos del campo, como las hojas, generan entre 1,65-2,0 toneladas; las raíces (cada 20-30 años) 0,87 toneladas; y finalmente, los estípites (cada 20-30 años) 0,4-0,67 toneladas (Van Dam, 2016).

## Figura 2.

### Representación morfológica del fruto de palma



Fuente: elaboración propia

La tabla 2 presenta la composición lignocelulósica y poder calorífico para algunos de los residuos de planta de beneficio. En este punto, es importante destacar que el contenido de lignina en el cuesco de la palma es notablemente superior. Esto podría explicar los valores tanto más altos como más bajos en el poder calorífico, debido a la presencia de enlaces complejos en la lignina que podrían servir como una fuente de energía aprovechable. Estos valores son también coherentes con lo reportado para el mesocarpio y los racimos de fruto vacío (RFV).

**Tabla 2.**

Composición química de los residuos de aceite de palma

	<b>RFV</b>	<b>Mesocarpio</b>	<b>Cuesco</b>	<b>Torta de palmiste</b>
<b>Celulosa</b>	38,3	34,5	20,8	35,7
<b>Hemicelulosa</b>	35,3	31,8	22,7	30,3
<b>Lignina (S/G)</b>	22,1	25,7	50,7	-
<b>Mayor poder calorífico</b>	17,5-19,0 GJ/t	19,7 GJ/t	20,5-21,5 GJ/t	-
<b>Menor poder calorífico</b>	6,4 GJ/t	13 GJ/t	15 GJ/t	-

Adaptación de (Van Dam, 2016)

### **6.3.3. Contenido ruminal bovino (CRB)**

El contenido ruminal, compuesto por alimentos no completamente digeridos, se localiza en el rumen, que es el primer compartimiento estomacal de los animales rumiantes. Este material se obtiene como subproducto durante el sacrificio de estos animales. Este residuo se puede considerar como una biomasa lignocelulósica (Colorado et al., 2022). Los resultados del análisis químico de la biomasa en cuestión revelan contenidos sustanciales en los componentes clave, expresados en términos de contenido en base seca. Se ha observado un contenido de celulosa de 27%, hemicelulosa de 22.2%, y lignina de 12.3%. Además, se ha documentado que la energía bruta de la biomasa alcanza un valor de 4.516 Kcal por kilogramo.

Estos hallazgos resaltan la relevancia y el potencial de esta biomasa en diversas aplicaciones, incluyendo la producción de bioenergía y la obtención de productos químicos de interés (el-Yassin et al., 1991).

Esta biomasa se caracteriza por tener un alto contenido de humedad, al punto que por cada res se generan de 40 kg a 50 kg, que en peso seco puede llegar al 10 kg (Ríos V., 2014).

#### **6.4. Aplicaciones**

Como se ha previamente mencionado, los productos resultantes de los procesos de pirólisis principalmente consisten en gases, bioaceites y biocarbones. La predominancia de estos subproductos está intrínsecamente ligada a los parámetros operacionales previamente definidos.

Los líquidos obtenidos productos de las pirolisis rápidas tienen amplios usos, entre estos: como fuentes de sustancias químicas extraíbles o como sustrato para la obtención de nuevos productos; como insecticida y fungicida debido a los fenoles y terpenoides encontrados en este; uso como fuente de energía debido a su alta densidad energética (Ábrego Garrués, 2010). El gas resultante de la pirólisis o syngas, presenta un amplio espectro de aplicaciones industriales, siendo utilizado en la producción de hidrógeno en biorrefinerías, así como en la síntesis de Diesel y gasolina. Además, es un precursor fundamental en la producción de fertilizantes mediante la generación de amoníaco, y desempeña un papel clave en la industria química al servir como materia prima para la producción de metanol (Basu, 2013). El biocarbón, conocido como charcoal, constituye un sólido negro con aplicaciones multifacéticas que abarcan su empleo como adsorbente de contaminantes, agente de remediación de suelos y opción en la matriz de combustibles alternativos (Danesh et al., 2023). Se discutirá en los siguientes párrafos los usos del material sólido en tres aplicaciones puntuales.

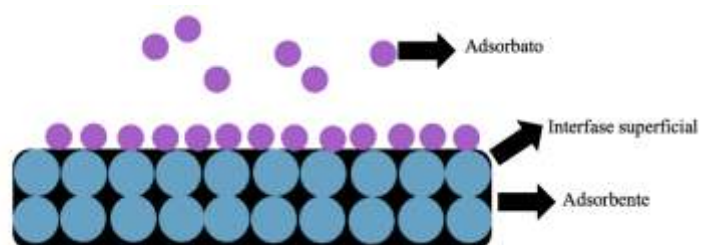
### 6.4.1. Capacidad de sorción y filtración

Debido a las excelentes propiedades porosas que exhiben los biocarbones han sido utilizados para la remoción de contaminantes orgánicos e inorgánicos (Danesh et al., 2023). Otra de las características que se aprovecha para tal fin, es la presencia de grupos funcionales oxigenados en la superficie de estos materiales, los cuales actúan como sitios activos que interaccionan con el contaminante (Shahib et al., 2022). Actualmente existen diferentes tipos de tratamientos de fuentes hídricas, sin embargo la sorción (adsorción o absorción) sigue resaltando por su eficiencia y facilidad de operación. En la figura 3 se ilustra el mecanismo de adsorción. Cuando una solución que contiene moléculas de un contaminante (también llamada adsorbato o sorbato) entra en contacto con un adsorbente (o sorbente), las fuerzas intermoleculares líquido-sólido causan que los adsorbatos migren y se depositen en la superficie del adsorbente. La adsorción puede clasificarse en fisisorción y quimisorción. Esto depende de la naturaleza del adsorbente y el adsorbato.

Diferentes autores han propuestos mecanismos para explicar por ejemplo la adsorción de metales, entre los que resaltan: interacciones electrostáticas con la superficie del biocarbón, intercambio catiónico con protones o metales alcalinos en la superficie del biocarbón, complejación de metales con grupos funcionales y estructura aromática rica en electrones  $\pi$  en el biocarbón., precipitación de metales para formar compuestos insolubles y reducción de especies metálicas y su sorción posterior (H. Li et al., 2017).

#### Figura 3.

Fenómeno de adsorción



#### **6.4.2. *Uso como combustibles sólidos***

La utilización de biocarbones como combustibles sólidos destaca primordialmente por su elevada densidad energética, la cual optimiza significativamente la eficiencia de las calderas en las que se emplean. Este atributo es fundamental, ya que permite generar una mayor cantidad de energía por unidad de masa en comparación con otros combustibles de origen biológico, haciendo de los biocarbones una opción altamente eficiente para la producción de calor. En comparación con el carbón fósil, presentan ventajas como la producción reducida de cenizas, una combustión uniforme y facilidades en el transporte (Anupam et al., 2016).

## **7. Antecedentes**

Se han llevado a cabo múltiples investigaciones acerca de la utilización de residuos agroindustriales en la generación de biocarbones a través de procesos de pirólisis. Estos biocarbones exhiben propiedades fisicoquímicas muy interesantes lo que los hace atractivos para su aplicación en diversas áreas. A continuación, se presenta una breve revisión de dichos hallazgos.

### **7.1. Biocarbones utilizados en la remoción de contaminantes**

Se han aprovechado diferentes residuos agroindustriales para remover diferentes contaminantes. En un estudio reciente realizado por Schmidt y colaboradores (2023) se investigó la utilización de hojas de palma datilera y cáscaras de pistachos en la producción de biocarbones a diferentes temperaturas (400°C - 800°C) con el propósito de eliminar trimetoprima, sulfametoxazol y sulfapiridina. Los resultados revelaron que los biocarbones generados a 800°C demostraron una eficiencia de eliminación superior al 90% para los tres antibióticos; sin embargo, para la sulfametoxazol y sulfapiridina las eficiencias de remoción

disminuyeron con la temperatura de reacción, indicando así que la temperatura desempeña un papel crucial en el proceso de adsorción de estos compuestos.

Por otra parte, Herrera y su grupo (2022) emplearon biocarbones derivados de cascarilla de arroz con el propósito de eliminar azitromicina y eritromicinas. Los carbones producidos a temperaturas de 450°C, 500°C, 550°C y 600°C demostraron una eficacia en la eliminación de estos compuestos a partir de soluciones que inicialmente contenían 200 mg L<sup>-1</sup>, logrando una remoción de más del 95%.

Konneh et al, (2021) evaluaron la eficacia de biocarbones obtenidos a partir de cáscara de coco, arroz y café en la eliminación de NO<sub>3</sub>-N y NO<sub>2</sub>-N de aguas contaminadas. Los resultados revelaron que el biocarbón de cáscara de coco mostró la mayor capacidad de adsorción, con 12,97 mg g<sup>-1</sup> para NO<sub>3</sub>-N y 0,244 mg g<sup>-1</sup> para NO<sub>2</sub>-N, atribuyéndose esto a su elevada porosidad. Por su parte, el biocarbón de cáscara de arroz exhibió capacidades de adsorción de 12,315 mg g<sup>-1</sup> para NO<sub>3</sub>-N y 0,233 mg g<sup>-1</sup> para NO<sub>2</sub>-N, mientras que el biocarbón de cáscara de café presentó valores de 12,08 mg g<sup>-1</sup> y 0,218 mg g<sup>-1</sup> para NO<sub>3</sub>-N y NO<sub>2</sub>-N, respectivamente.

Residuos de la industria ganadera también han sido utilizados, en su estudio Xu et al., (2013) emplearon cáscaras de arroz y estiércol bovino para eliminar los metales pesados Pb, Cu, Zn y Cd. El biocarbón de estiércol bovino demostró una eficacia superior en la eliminación de los cuatro metales en comparación con el biocarbón de cáscara de arroz. Se observaron capacidades de eliminación superiores a 486 mmol kg<sup>-1</sup> para cada metal, en contraste con el biocarbón de cáscara de arroz que mostró capacidades de eliminación más bajas, oscilando entre 65,5 y 140 mmol kg<sup>-1</sup>. Cuando la concentración de cada metal era de 1 mM en el sistema multimetálico, se observó una reducción significativa en la eliminación de metales por parte del biocarbón de arroz, variando entre un 38,4% y un 100%, mientras que la reducción para el

biocarbón de estiércol fue más moderada, entre un 2% y un 40,9%. La eliminación del metal a través del biocarbón derivado del estiércol se atribuyó principalmente a la precipitación con  $\frac{2-}{3}$  o  $\frac{3-}{4}$ . Por otro lado, en el caso del biocarbón de cáscara de arroz, la eliminación de metales se debió principalmente a la formación de complejos con enlaces fenólicos simples (-OH).

## 7.2. Biocarbones como combustibles sólidos

Una de las biomásas más versátiles como se puede ver en estudios anteriores, es la cascara de arroz, esta ha sido utilizada igualmente para la producción de biocarbones con fines de combustible sólido.

En el estudio realizado por Yadav y su equipo(2019) , se produjo biocarbón a partir de cascarilla de arroz, optimizando los parámetros a 432 °C, 4 °C min<sup>-1</sup> y 40 min para la temperatura, velocidad de calentamiento y tiempo, respectivamente. Bajo estas condiciones óptimas, se obtuvieron los siguientes resultados: un rendimiento del biocarbón del 54.65%, un valor de calentamiento superior de 25,08 MJ kg<sup>-1</sup>, una densidad de energía de 1,46 y un rendimiento de energía del biocarbón del 79,66%.

En el estudio hecho por Hadey y sus colaboradores (2022) se elaboraron biocarbones a partir de cáscaras de cacahuete y bagazo de caña de azúcar, utilizando diversas temperaturas de pirólisis. Se procedió a la evaluación de las características de la biomasa y el biocarbón resultante, incluyendo su poder calorífico, morfología, porosidad y desempeño en términos de combustión. Se constató que el biocarbón presentaba notables ventajas en calidad como fuente de energía en contraste con la biomasa original, y que un incremento en la temperatura de pirólisis reforzaba aún más estas propiedades. El propósito fundamental del estudio radicó en la producción de biocarbón sustentable, a partir de desechos de biomasa, con miras a su aplicación como recurso de combustible sólido.

Por otro lado Lubwama & Yiga (2018), fabricaron briquetas de biocarbon como fuente de combustible sostenible para la cocina en el hogar, utilizando cáscaras de café y cáscaras de arroz con arcilla y almidón de yuca como aglutinantes. Los resultados destacaron que el tipo de aglutinante influyó significativamente en las características físicas y el poder calorífico de las briquetas. Las briquetas con almidón de yuca como aglutinante tuvieron un poder calorífico superior (21,9 a 23,0 MJ kg<sup>-1</sup>), mientras que las de arcilla tuvieron un poder calorífico más bajo (15,9–16,6 MJ kg<sup>-1</sup>), y la resistencia al desgaste se vio afectada por las propiedades de la biomasa y las cenizas del aglutinante

## **8. Metodología**

### **8.1. Materiales**

Se recolectaron las biomásas de cisco de café, cascarilla de palma, contenido ruminal bovino de las industrias trilladora el Guane, acuña Ltda y Colbeef respectivamente . Por otra parte, se empleó azul de metileno al 1% de biopharchem y plomo, como contaminantes modelos. Para ajustar el pH de la solución se utilizó NaOH de Supelco, Inc y HCl.

### **8.2. Preparación de las materias primas**

#### ***8.2.1. Determinación del porcentaje de humedad***

En el contexto de este proyecto, se llevará a cabo un proceso integral que incluirá la estandarización de los niveles de humedad con el objetivo de alcanzar un contenido de humedad inferior al 30% porque la cantidad de humedad presente en la biomasa ejerce una influencia significativa en la eficiencia del proceso térmico .

Inicialmente, se pesaron 2,0 gramos de cisco de café (CC), cascarilla de palma (CP) y contenido ruminal bovino (CRB) cada biomasa. Utilizando un analizador de humedad PMB 202 de la reconocida marca Adam Equipment, se procedió a determinar el contenido de humedad de cada muestra. La configuración del equipo se llevó a cabo con parámetros específicos, estableciendo una temperatura estándar de 105°C y un intervalo de tiempo de resultado de 10 segundos (SEC 10). Se desactivó la función RAPID, y el STOP: TIME se fijó en 30 minutos. La tabla 3 exhibe los resultados de humedad de cada biomasa, en donde se observa que los valores de CP y CC se encuentran por debajo de 30%, sin embargo, CRB sobrepasa el valor aceptado alcanzando un 70,3%, por lo que esta biomasa es el única que debe ser sometida al proceso de secado.

Tabla 3.

Porcentaje de humedad de las materias primas

<b>Biomasa</b>	<b>%humedad</b>
CP	12,8
CC	10,13
CRB	70,3

### 8.2.2. Secado

Para el desarrollo del nuevo método, se utilizó un terreno facilitado por la empresa Colbeef, la cual también se encargó del alquiler de un molino de cuchillas. El proceso de secado se llevó a cabo de la siguiente manera: se preparó un área de 5.3 m<sup>2</sup>, protegida con plástico, donde se colocó 1 m<sup>3</sup> de CRB crudo (ver Figura 4). Con el apoyo de un rastrillo, el material se redistribuyó cada 30 minutos durante el día para asegurar un secado uniforme. Este procedimiento se extendió a lo largo de 10 días, permitiendo que el material se secase al sol. Sin embargo, se presentaron días con precipitaciones, lo que obligó a cubrir el material e impidió su mezcla durante esos períodos. Afortunadamente, en los días sin lluvia, se registraron temperaturas diurnas que fluctuaron entre los 34°C y 40°C, condiciones que favorecieron la continuación del secado.

### Figura 4.

Área de secado CRB en las instalaciones Colbeef



Fotografía tomada por el autor

### 8.2.3. Molienda

Posteriormente, se molieron las biomásas con el fin de obtener un tamaño de partícula más homogéneo que se encuentre dentro de un rango específico de 1 a 2 milímetros. Este enfoque multifacético asegurará la optimización de las condiciones de las materias primas, permitiendo así un rendimiento más eficiente y consistente en las etapas subsiguientes del proyecto.

Con un contenido de humedad del cisco de café (CC) inferior al 30%, se procedió directamente a la fase de molienda de esta biomasa. Las pruebas iniciales se realizaron utilizando un molino de cuchillas de dimensiones reducidas, tal como se muestra en la Figura 5. Debido a la capacidad limitada del molino disponible en Tecnoparque, fue necesario recurrir al molino ubicado en Colbeef para el tratamiento del CC. Además, con el fin de incrementar la cantidad en el tamizado, se diseñó un cernidor con una malla mesh número 12 y dimensiones de 70 cm x 60 cm.

#### Figura 5.

Proceso de molienda del cisco de café



La cascarilla de palma (CP), al igual que el cisco de café (CC), no requiere un proceso de secado debido a su bajo contenido de humedad. Además, el material posee un tamaño de partícula reducido, lo que implica que el único pretratamiento necesario para esta biomasa es el tamizado con el mismo cernidor que se utilizó para el contenido ruminal bovino (CRB) y el cisco de café (CC). En la Figura 6 se ilustra la diferencia entre el material en su estado crudo y tamizado. Así mismo, la figura muestra el pretratamiento del CRB.

**Figura 6.**

Cascarilla de palma tamizada



**Figura 7.**

Contenido ruminal bovino molido y tamizado



### 8.3. Obtención de los biocarbones

En primera instancia se procedió a establecer los parámetros óptimos de operación de pirólisis para la producción de biocarbones con propiedades fisicoquímicas que favorecieran sus aplicaciones en remoción de contaminantes de fuentes hídricas y su empleo como combustibles fósiles. Para este fin, se realizó una detallada revisión de literatura en donde se estudiaron una amplia variabilidad en las condiciones de operación. Para el uso de biocarbones como combustibles sólidos, se encontraron rangos de temperatura de reacción de 400°C a 500°C, según lo reportado por Allouch et al., 2023; Hadey et al., 2022 y Yadav et al., 2019. Por otro lado, para su empleo como sorbentes, las temperaturas identificadas variaron entre 350°C y 700°C, de acuerdo con lo indicado por Konneh et al., 2021; Yavari et al., 2017.

Se estableció una temperatura de reacción de 750 °C para la pirólisis de las tres biomazas: cisco de café (CC), cáscara de palma (CP) y contenido ruminal bovino (CRB), basándose en una cuidadosa revisión bibliográfica. Esta temperatura unificada permite comparar de manera eficaz los biocarbones obtenidos y entender el comportamiento único de cada biomasa bajo condiciones idénticas de procesamiento. La elección de 750 °C está también respaldada por estudios termogravimétricos previos, especialmente en la cáscara de palma, que demostraron una liberación continua de compuestos volátiles más allá de los 600°C. Optar por esta temperatura más elevada busca maximizar la eliminación de subproductos no deseados y lograr un mayor grado de carbonización, con el fin de producir biocarbones de superior pureza y calidad para diversas aplicaciones.

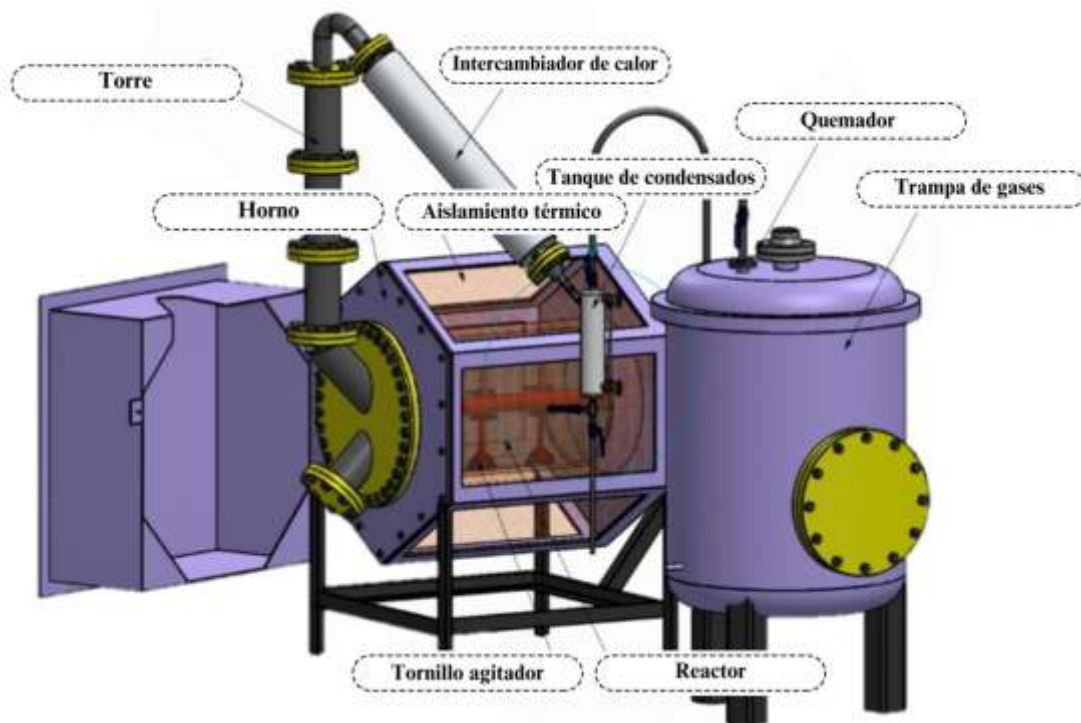
Por otra parte, la literatura sugiere que el tiempo óptimo de sostenimiento para la producción de combustibles sólidos y medios filtrantes es de dos horas, según Allouch et al. (2023) y Konneh et al. (2021). Este mismo intervalo de tiempo se aplicará también en estudios de remediación de suelos para mantener la coherencia en el tratamiento de las biomazas.

Además, con el fin de asegurar un entorno de reacción exento de oxígeno, la pirólisis se efectuará bajo un flujo constante de nitrógeno a 5 CFH, garantizando así las condiciones anóxicas necesarias para el proceso.

En la figura 7, se observa el reactor pirolítico empleado para la transformación termoquímica de las tres biomásas; CC, CP y CRB. Los carbones obtenidos se nombran como CC-750 (cisco de café a 750 °C), CP-750 (cascarilla de palma a 750 °C) y CRB-750 (contenido ruminal bovino a 750 °C).

### Figura 8.

Reactor empleado para la obtención de los biocarbones



#### 8.4. Caracterización de las biomásas y los biocarbones

Las CC, CP y el CRB y sus biocarbones CC-750, CP-750 y el CRB-750 se sometieron a un análisis termogravimétrico (TGA) para estudiar los cambios en la masa en función del cambio de temperatura. Por otro lado se llevó cabo la determinación del poder calorífico superior (PCS) empleado para evaluar la eficiencia energética de las biomásas CC, CP y CRB.

Además, un análisis bromatológico fue indispensable para conocer la composición química y nutricional de todos los materiales. Adicionalmente, se utilizó la microscopia electrónica de barrido (SEM) para estudiar morfológicamente y topográficamente a los biocarbones. Por último, se estudiaron las propiedades porosas de todos los materiales empleando el método BET.

#### ***8.4.1. Análisis termogravimétrico (TGA)***

Para el presente análisis se empleó una Balanza Termogravimétrica (TGA) 5500 de TA INSTRUMENTS. Ésta técnica termoanalítica se emplea para medir la variación de masa de una muestra bajo temperaturas y una atmósfera inerte de nitrógeno con flujo de gas de 25 °C min<sup>-1</sup>. La variación de masa puede ser pérdida o ganancia. El equipo cuenta con un auto-muestreador que monta la muestra de manera automática y opera en un rango de temperatura de ambiente que va desde 10 hasta 950 °C.

#### ***8.4.2. Poder calorífico***

La muestra fue sometida a un análisis triplicado de poder calorífico utilizando el método de la bomba calorimétrica conforme a la norma ASTM D4809-13. Inicialmente, se tomó una cantidad representativa, pesándola en la balanza Kern PBF con un rango entre 1,00 y 1,10 g. Posteriormente, se llevó a cabo el montaje en la bomba calorimétrica modelo C200 de la marca P.A. Hilton Ltd. Las mediciones se realizaron a una temperatura ambiente de 23 °C, utilizando oxígeno al 99,999% para generar la atmósfera necesaria para la ignición y la determinación del poder calorífico.

#### ***8.4.3. Análisis fisicoquímico***

Se determinaron parámetros fisicoquímicos de las muestras con el fin de estudiar su composición química y algunas de sus propiedades como pH y conductividad eléctrica

empleando métodos estándar o procedimientos internos del laboratorio químico de consultas industriales. Para la determinación de nitrógeno total se empleó el método de digestión Kjeldahl-titrimético. Por otro lado, el % de humedad, el % de cenizas, la densidad ( $\text{g cm}^3$ ), silicio total ( $\%\text{SiO}_2$ ), y pérdidas por volatilización se analizaron por gravimetría. Por otro lado, el potasio total ( $\text{K}_2\text{O}$ ), sodio total ( $\%\text{Na}$ ), calcio total ( $\%\text{CaO}$ ), magnesio total ( $\%\text{MgO}$ ), manganeso total ( $\%\text{MnO}$ ), cobre total ( $\%\text{Cu}$ ), cinc total ( $\%\text{Zn}$ ), hierro total ( $\%\text{Fe}$ ) y azufre total ( $\%\text{S}$ ) se determinaron empleando el método de absorción atómica. Por último, el carbono orgánico total oxidable ( $\%\text{C}$ ) y el fósforo total ( $\%\text{P}_2\text{O}_5$ ) se evaluaron a través de espectrofotometría.

#### ***8.4.4. Análisis elemental (CHNS)***

Este análisis se realizó para determinar el porcentaje total de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre en las muestras mediante el método de combustión total empleando el equipo Analizador elemental Vario Elcubo, Elementar, el cual alcanzó temperaturas en la columna de combustión y en la columna de reducción de  $1150\text{ }^\circ\text{C}$  y  $850\text{ }^\circ\text{C}$ , respectivamente, con un flujo de gas de arrastre de  $230\text{ mL/min}$ . Basándose en estos resultados, se calculó el porcentaje de oxígeno utilizando la fórmula  $100\% - (\%\text{C} + \%\text{H} + \%\text{N} + \%\text{S} + \%\text{ceniza})$ , lo que también permitió determinar los radios atómicos H/C y O/C.

#### ***8.4.5. Microscopia electrónica de barrido (SEM)***

Esta técnica avanzada de análisis permite ampliar significativamente los materiales para examinar en detalle sus propiedades porosas, morfología y características superficiales. Se logra mediante el uso de un haz de electrones de alta energía que interactúa con la muestra, proporcionando imágenes de alta resolución de su estructura interna y superficie. Para realizar este minucioso estudio, se utilizó el microscopio electrónico de barrido TESCAN VEGA3, un equipo de vanguardia diseñado para ofrecer una visión profunda y detallada a nivel

microscópico, facilitando así la comprensión de las complejidades físicas y químicas de los materiales analizados.

#### **8.4.6. Análisis de propiedades porosas**

El método BET (Brunauer, Emmett y Teller) se empleó para determinar el área BET y el volumen del poro a partir de las isothermas de adsorción y desorción de N<sub>2</sub>. Las muestras se pesaron en celdas de 9 mm de diámetro fabricadas en vidrio borosilicato, Micromeritics. Posteriormente, se desgasificaron a 350°C y 6 Pa por 6 h en un equipo Vac Prep 061, Micromeritics. La captura de las isothermas de adsorción de nitrógeno se realizó a 77 K en un equipo 3FLEXTM de Micromeritics, en un intervalo de presión relativa (P/P01) entre 0,0025 y 0,9999. El análisis de los datos fue realizado con el programa 3FLEX V.4.03, provisto por el equipo.

### **8.5. Aplicaciones**

Luego de obtener los biocarbones y llevar a cabo un análisis fisicoquímico y morfológico exhaustivo, se procedió a realizar pruebas detalladas para evaluar su potencial aplicación en remoción de contaminantes y como combustibles sólidos. Estas pruebas incluyeron investigaciones específicas sobre la capacidad de sorción de azul de metileno y plomo y la eficacia como material combustible. El objetivo fue obtener una comprensión integral de las propiedades de los biocarbones y determinar su idoneidad en distintos contextos de aplicación, contribuyendo así a su potencial uso en procesos medioambientales y energéticos.

#### **8.5.1. Remoción de contaminantes de un medio acuoso**

Se seleccionaron dos sorbatos modelo, uno de naturaleza orgánica y otro inorgánica, con el propósito de evaluar la capacidad de los biocarbones para eliminar estos compuestos del medio acuoso. Además de esto, se llevó a cabo un análisis detallado de las posibles

interacciones entre el sorbato y el sorbente. El azul de metileno, una molécula orgánica catiónica, es comúnmente utilizado como colorante en diversas industrias como la textil, plástica, cosmética y papelera, y también encuentra aplicaciones médicas (Pathania et al., 2017). No obstante, diversos estudios han revelado sus efectos tóxicos, que incluyen problemas respiratorios, hipertensión, taquicardia y vómitos (Mosoarca et al., 2022).

Por otro lado, la presencia de azul de metileno en fuentes hídricas no solo provoca una apariencia desagradable, sino que también genera una baja penetración de la radiación ultravioleta, afectando el proceso fotosintético de algunas plantas y teniendo repercusiones en la vida marina. El estudio de la capacidad de los biocarbones para eliminar este compuesto busca contribuir al entendimiento de su eficacia en la remoción de contaminantes, con potenciales beneficios medioambientales.

Además, se seleccionó el plomo como el contaminante inorgánico modelo, dado que los metales pesados poseen un alto nivel de toxicidad. A pesar de esto, diversas industrias, como las curtiembres, la electrodeposición, la fabricación de equipamiento electrónico, las plantas de procesos químicos y la industria de combustibles fósiles, continúan utilizando estos elementos. Las elevadas concentraciones de este ion metálico pueden ocasionar anemia, daño cerebral, afectaciones en el sistema nervioso, hipertensión, dolores de cabeza, entre otros efectos perjudiciales para la salud.

Debido a estos riesgos, la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha establecido un límite permisible para la presencia de plomo en el agua destinada al consumo humano, fijando este límite en  $0,01 \text{ mg L}^{-1}$ . Este parámetro sirve como referencia crítica para evaluar y garantizar la calidad del agua potable en términos de seguridad frente a los riesgos asociados con el plomo (Ghahremani et al., 2021).

### **8.5.1.1. Azul de metileno**

**8.5.1.1.1. Cinética de adsorción.** Se adoptó el procedimiento descrito por Güleç et al. (2022), Sangsuk et al. (2023) y K. Wang et al. (2023) como base para llevar a cabo el presente estudio. En primer lugar, se realizó una curva de calibrado de 10 a 35 mg L<sup>-1</sup>. Posteriormente se aplicó el procedimiento experimental en el que se prepararon 10 batch de cada biocarbón en donde cada batch contenía 10 mg de las muestras CC, CP y CRB y 10 mL de una solución de azul de metileno a una concentración de 20 mg L<sup>-1</sup> a temperatura ambiente. Las dispersiones se agitaron de manera constante a 120 rpm durante un período de 3 horas con el propósito de determinar el tiempo de equilibrio en cada concentración. Posteriormente, se procedió a la centrifugación durante 5 minutos a 4000 rpm para separar el sorbente, y el sobrenadante resultante se cuantificó mediante espectroscopia UV-Vis a una longitud de onda de 664 nm. Cabe destacar que cada experimento fue repetido en tres ocasiones para asegurar la robustez de los resultados obtenidos.

**8.5.1.1.2. pH de óptimo.** Después de establecer el tiempo de equilibrio adecuado para los ensayos de adsorción, se emprendió la tarea de identificar el pH óptimo que facilita la máxima sorción del azul de metileno. Con este propósito, se prepararon mezclas consistiendo en 10 mg de cada uno de los biocarbones (CC, CP y CRB) con 10 mL de una disolución de azul de metileno a una concentración inicial de 20 mg L<sup>-1</sup>. Para explorar el efecto del pH en la capacidad de sorción, el pH de estas soluciones se ajustó meticulosamente en un rango ampliado de 2 a 12, utilizando para ello soluciones de HCl 0,1 M y NaOH 0,1 M, respectivamente.

Cada una de estas mezclas fue sometida a agitación constante a una velocidad de 120 rpm durante un periodo continuo de 7 horas. Este protocolo se diseñó para asegurar la completa interacción entre el sorbente y el sorbato, permitiendo alcanzar un estado de equilibrio. Al

concluir el periodo de agitación, las mezclas fueron centrifugadas a 4000 rpm durante 5 minutos. Este paso facilitó la separación eficaz del sorbente del líquido, permitiendo una recolección limpia del sobrenadante para análisis posterior. La determinación de la concentración residual de azul de metileno en el sobrenadante se realizó mediante técnicas de espectroscopia UV-Vis, centrandó la atención en la longitud de onda de 664 nm, que corresponde al pico de absorción característico de esta molécula.

**8.5.1.1.3. Concentración inicial de azul de metileno.** En la fase subsiguiente del estudio, se procedió a evaluar el comportamiento de adsorción de los biocarbones frente a variaciones en la concentración del azul de metileno, empleando para ello concentraciones específicas de 20, 25 y 30 mg L<sup>-1</sup>. Esta evaluación se llevó a cabo manteniendo las condiciones óptimas previamente identificadas para cada uno de los biocarbones, incluyendo el pH óptimo de cada biocarbón y el tiempo de equilibrio establecido en 7 horas. Cada batch experimental consistió en 10 mg de biocarbón en contacto con 10 mL de la solución de azul de metileno a las concentraciones mencionadas, asegurando una agitación constante a 120 rpm. Esta agitación garantizó una interacción homogénea entre el sorbente y el sorbato, facilitando así el proceso de sorción. Al finalizar el periodo de interacción, las muestras fueron centrifugadas a 4000 rpm durante 5 minutos, un paso crítico para separar los sólidos adsorbidos del líquido, permitiendo la medición precisa del sobrenadante.

Para cuantificar la efectividad del proceso de sorción a cada concentración se recurrió a la medición de la absorbancia por UV-Vis a 664 nm y a partir de este valor, se determinó la concentración final después del proceso de remoción.

**8.5.1.1.4. Cinética de adsorción final.** Finalmente, se realizó una serie de experimentos cinéticos finales ajustando la concentración y pH óptimos para cada uno de los biocarbones (CC, CP y CRB). Este proceso consistió en mezclar 10 mg de biocarbón con 10 mL de solución

de azul de metileno, manteniendo la agitación a 170 rpm durante un periodo de 7 horas y tomando alícuotas cada hora para evaluar la capacidad de sorción de los biocarbones en las condiciones óptimas ajustadas durante este estudio. Luego, cada alícuota se cuantificó por UV-Vis tomando el valor de la absorbancia a 664 nm.

Finalmente, se emplearon dos ecuaciones fundamentales para todos los ensayos. La primera ecuación permitió calcular la cantidad de azul de metileno adsorbido por unidad de masa del biocarbón a un tiempo determinado  $t$ . La segunda ecuación se enfocó en determinar la capacidad de adsorción en el equilibrio.

$$= \frac{(C_0 - C_t)}{m} \quad (1)$$

$$\dots \dots \dots = \frac{(C_0 - C_e)}{m} \quad (2)$$

Donde:

$C_0$  ( $\text{mg L}^{-1}$ ) es la concentración inicial de azul de metileno,

$C_t$  y  $C_e$  ( $\text{mg L}^{-1}$ ) son las concentraciones en el tiempo  $t$  y en el equilibrio, respectivamente,

$V$  (L) es el volumen de la solución,

$m$  (g) es la masa del biocarbón.

Con base en estos parámetros se obtendrán las isotermas de adsorción.

### 8.5.1.2. Plomo

**8.5.1.2.1. Cinética de adsorción.** Se procedió a la preparación de las muestras pesando meticulosamente 1,00 g de cada uno de los biocarbones identificados como CC, CP y CRB, colocándolos en frascos de 250 mL. A cada frasco, se adicionaron 100 mL de una solución de Pb (II) a una concentración inicial de 10 mg L<sup>-1</sup>. Estas mezclas se sometieron a agitación constante a 200 rpm a temperatura ambiente, con el fin de facilitar la interacción entre el biocarbón y los iones de plomo durante los periodos establecidos de 1, 2 y 3 horas.

Para la recopilación de datos en cada uno de estos intervalos temporales, se extrajeron cuidadosamente alícuotas de aproximadamente 5 mL usando jeringas con capacidad de 5 mL. Posteriormente, estas muestras fueron filtradas utilizando filtros de membrana con un poro de 0,22 µm para asegurar la remoción de partículas sólidas y obtener una solución clara para el análisis. La concentración remanente de iones Pb (II) en cada una de las muestras filtradas se determinó mediante la técnica de espectroscopía de absorción atómica, una metodología precisa para la cuantificación de metales pesados en soluciones acuosas.

**8.5.1.2.2. pH óptimo.** Para investigar el efecto del pH en la capacidad de adsorción de los biocarbones hacia iones Pb (II), se prepararon soluciones de este metal a una concentración de 10 mg L<sup>-1</sup>, ajustando el pH a valores de 2, 4, 6, 8, 10, y 12. Este ajuste se realizó mediante la adición cuidadosa de soluciones de ácido clorhídrico (HCl) 0,1 M o hidróxido de sodio (NaOH) 0,1 M, según fuese necesario para alcanzar el pH deseado, lo cual permitió evaluar la influencia del ambiente ácido o básico en la interacción entre los iones de plomo y la superficie de los biocarbones.

En recipientes de 250 mL de capacidad, se dispuso de manera precisa 1,00 g de cada uno de los biocarbones seleccionados para el estudio. A cada uno de estos se le adicionaron 100 mL de la solución de Pb (II) preparada, con el pH previamente ajustado. Las mezclas

resultantes se sometieron a agitación a una velocidad constante de 200 rpm durante un periodo de 2 horas. Este procedimiento aseguró una mezcla homogénea y una interacción eficiente entre el biocarbón y los iones de plomo.

Finalizada la agitación, las muestras fueron filtradas para separar el biocarbón de la solución, utilizando el mismo método descrito anteriormente, que incluye el uso de filtros de membrana con un tamaño de poro de 0.22  $\mu\text{m}$ . La concentración de iones Pb (II) en el líquido filtrado se determinó utilizando la técnica de espectroscopía de absorción atómica, permitiendo así cuantificar la cantidad de plomo que fue removida del medio acuoso por cada biocarbón.

*8.5.1.2.3. Dosis de adsorbente y concentración inicial del adsorbato.* Se diseñó un experimento utilizando frascos de 250 mL, en los cuales se dispusieron cantidades específicas de biocarbón, siendo 0,10 g, 0,50 g, y 1,00 g para cada muestra. A estos frascos se les añadió 100 mL de soluciones de Pb (II) con las siguientes concentraciones: 5,00 y  $\text{mg L}^{-1}$ , y 10,00  $\text{mg L}^{-1}$ . Este diseño experimental permitió mantener constante la cantidad de biocarbón mientras se exploraba el efecto de diferentes concentraciones de Pb (II) y viceversa.

Las mezclas se mantuvieron en agitación a una velocidad de 200 rpm durante 2 horas a temperatura ambiente y el pH óptimo de cada biocarbón determinado en la sección anterior. Posterior a la agitación, se procedió a filtrar las muestras para separar los sólidos de la solución, empleando un proceso de filtración adecuado para retener el biocarbón y permitir el análisis de la solución filtrada.

La concentración de Pb (II) remanente en las soluciones fue determinada utilizando la técnica de Absorción Atómica, específicamente con un espectrómetro Agilent 200 Series AA modelo 280FSAA. Este equipo fue calibrado y ajustado previamente, aplicando un método estandarizado y validado para la cuantificación de Pb (II) en un rango de concentración lineal

desde 0,10 mg L<sup>-1</sup> hasta 5,00 mg L<sup>-1</sup>, logrando un coeficiente de correlación promedio de 0.9992.

**8.5.1.2.4. Cinética de adsorción final.** Se pesó 1,0 g de cada biocarbón en 100 mL de una disolución de Pb (II) 10 mg L<sup>-1</sup> manteniendo el pH constante óptimo de cada biocarbón durante un periodo de 2 horas con agitación continua. Se tomaron alícuotas en intervalos regulares de tiempo, específicamente al tiempo 0, 20, 40, 60, 80, 100 y 120 minutos. Este enfoque permitió realizar un seguimiento detallado de la cinética de adsorción a lo largo del tiempo, analizando la capacidad del biocarbón para eliminar el contaminante bajo condiciones específicas.

**8.5.1.3. Ajustes cinéticos e isotermas de sorción.** En el marco de este estudio, se implementaron los modelos cinéticos de pseudo primer y segundo orden, así como las isotermas de adsorción de Langmuir y Freundlich. Estos enfoques proporcionan herramientas analíticas fundamentales para caracterizar y comprender la dinámica y la capacidad de sorción de los biocarbones en estudio. El uso de estos modelos matemáticos contribuye a una evaluación exhaustiva de los procesos de sorción, permitiendo una interpretación más detallada de las interacciones entre los biocarbones y los contaminantes.

### **8.5.2. Evaluación de biocarbones como combustibles sólidos**

Con el fin de validar la utilización del biocarbón como fuente de combustible sólido, se implementó el protocolo metodológico que Lubwama & Yiga emplearon en 2018. Tras obtener los biocarbones, se procedió a mezclarlos con un aglutinante, utilizando en este caso almidón de yuca, para la producción de briquetas de biocarbón. La obtención del aglutinante involucró la mezcla de 30 g de almidón con 50 mL de agua en un matraz Erlenmeyer, llevándolo a una temperatura de 90°C con agitación manual constante hasta alcanzar el punto de gelatinización del almidón.

A continuación, se añadieron 25 gramos de almidón a una muestra de 100 gramos de biocarbón, seguido de un prensado a una presión de 230 megapascales (MPa) en un molde de forma ovalada. Posteriormente, se permitió que estas briquetas se secaran a temperatura ambiente durante un período de 15 días. De la serie resultante de briquetas, se seleccionaron 100 gramos, los cuales se encendieron con la ayuda de una llama de fogón durante 15 minutos. Tras su ignición, se colocaron debajo de un soporte metálico con función de asador, con el objetivo de calentar 250 mL de agua contenidos en un recipiente metálico.

Se realizó la medición de la temperatura del agua cada 5 minutos a lo largo de un periodo de dos horas, con el propósito de determinar la temperatura máxima alcanzada y el tiempo requerido para llegar a dicha temperatura. Este proceso experimental permitió evaluar retrospectivamente la eficiencia del biocarbón como combustible sólido en condiciones prácticas de cocción o calentamiento, validando su potencial aplicación como una alternativa sostenible a los combustibles convencionales.

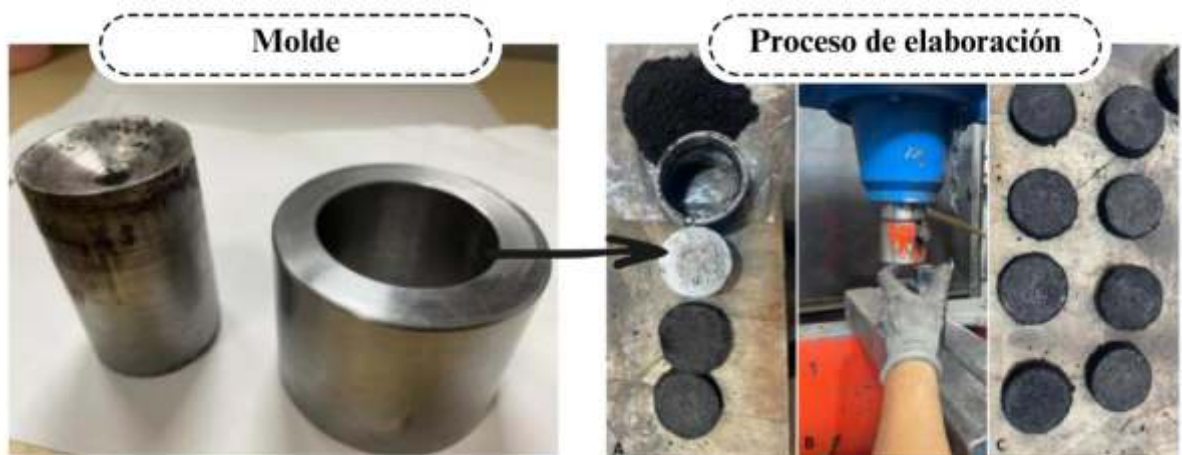
**8.5.2.1. Elaboración de las briquetas.** Se diseñó y fabricó un molde específico para la formación de las briquetas en el presente estudio. Este molde se configuró como un cilindro de cavidad hueca, construido en acero inoxidable, con una altura de 5,65 cm, un diámetro externo de 7,25 cm y un diámetro interno de 5 cm. Con el propósito de generar la presión necesaria durante el proceso de compactación, se elaboró un cilindro adicional macizo, con una longitud de 7,25 cm y un diámetro de 5 cm. Este molde diseñado y detallado se encuentra representado en la Figura 7 del presente informe.

Las briquetas en promedio tuvieron un peso de 48 g y las dimensiones obtenidas era de 1,5 cm de altura y 5 cm de diámetro. Para eliminar la humedad que pudiese generar efectos desfavorables al combustible se procedió a secar estas briquetas la temperatura ambiente por

dos días, después de estos se observó que el peso de estas bajo en promedio a 45 g cada una de las briquetas.

**Figura 9.**

Proceso de elaboración de las briquetas empleadas como combustibles sólidos



## **9. Resultados y discusión**

### **9.1. Caracterización de las biomásas y los biocarbones**

La investigación de las propiedades fisicoquímicas y la morfología de los materiales de partida y los biocarbones desempeña un papel crucial, ya que proporciona una comprensión profunda de las transformaciones que ocurren durante los procesos térmicos. Estos procesos térmicos, al potenciar ciertas propiedades, resultan fundamentales para diversas aplicaciones. Analizar en detalle estas características es esencial para conocer el comportamiento y las potencialidades de los materiales, brindando valiosa información sobre su viabilidad y eficacia en distintos contextos de aplicación.

#### ***9.1.1. Biomásas***

La elección de los materiales de partida se basa en que los residuos provenientes de las industrias regionales representan una valiosa oportunidad para su aprovechamiento y valorización en la producción de materiales de alto valor añadido, como son los biocarbones. Esta selección no solo busca gestionar de manera más sostenible los desechos industriales, sino que también aspira a transformarlos en recursos valiosos que posean propiedades significativas y aplicaciones diversas. La consideración de estos residuos como materias primas potenciales para la obtención de biocarbones no solo apunta a una gestión más eficiente de los recursos, sino que también abre la puerta a la generación de productos con beneficios ambientales y económicos notables.

En la fase inicial de la investigación, se llevó a cabo una caracterización de las biomásas. Este proceso incluyó un análisis de sus propiedades fisicoquímicas, lo cual permitió comprender mejor la composición química. Además, se evaluó su estabilidad térmica, un aspecto crucial para determinar su comportamiento y resistencia bajo condiciones de variación

de temperatura. Finalmente, se examinó la estructura porosa de las biomásas, ya que la porosidad es un factor determinante en la eficiencia de procesos como la adsorción, el almacenamiento y la conversión de energía.

**9.1.1.1. Propiedades fisicoquímicas.** Los resultados derivados de la evaluación de diversos parámetros fisicoquímicos para las biomásas se presentan detalladamente en la tabla adjunta. Como se observa, cada biomásas exhibe valores diferentes inherentes a su naturaleza. De manera particular, se observa que el pH de las tres biomásas analizadas muestra una tendencia ácida, destacando el CP por registrar el valor más bajo, con una acidez marcada de 4,16. Este dato sugiere una composición química específica que podría influir en su aplicación y manejo. Por otro lado, se destaca el CRB por su alta conductividad eléctrica, la cual alcanza un valor de  $1353 \mu\text{S cm}^{-1}$ . Este indicador de conductividad eléctrica sobresaliente en el CRB sugiere una mayor presencia de iones disueltos que se liberan. Frecuentemente, la estructura de la biomasa se categoriza en elementos primarios, secundarios y traza. Entre los elementos primarios figuran el carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N), calcio (Ca) y potasio (K). En contraste, los elementos secundarios abarcan silicio (Si), magnesio (Mg), aluminio (Al), azufre (S), hierro (Fe), fósforo (P), cloro (Cl) y sodio (Na), mientras que los elementos traza comprenden manganeso (Mn) y titanio (Ti). El contenido de humedad en las tres biomásas analizadas es inferior al 30%, lo cual las hace adecuadas para ser procesadas mediante pirólisis. Este bajo porcentaje es un indicador favorable, ya que niveles elevados de humedad pueden afectar negativamente la eficiencia del proceso de conversión termoquímica. Adicionalmente, se observa que la biomasa CP presenta el mayor porcentaje de cenizas entre las muestras estudiadas. La determinación de este parámetro es crucial, dado que un contenido elevado de cenizas en la biomasa puede generar complicaciones durante el proceso termoquímico. Además, las cenizas pueden influir en la calidad del biocarbón producido.

**Tabla 4.**

Análisis fisicoquímico de las biomásas de partida

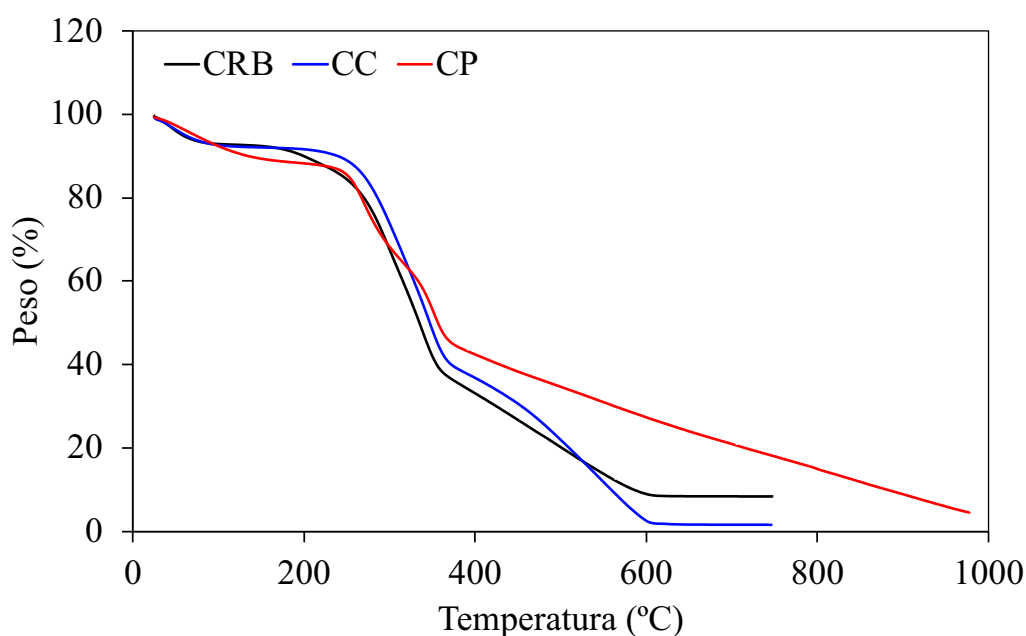
<b>Parámetros</b>	<b>CC</b>	<b>CP</b>	<b>CRB</b>
pH	5,77	4,16	5,79
Conductividad ( / )	316	518	1353
Nitrógeno total (%N)	0,818	0,439	0,157
Humedad (%)	11,13	12,38	10,46
Potasio total(%K <sub>2</sub> O)	0,497	0,143	0,198
Carbono orgánico total oxidable (%C)	49,84	38,29	40,42
Fósforo total (%P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0,335	0,401	0,623
Sodio total (%Na)	0,115	0,125	0,248
Calcio total (%CaO)	1,261	1,224	1,514
Magnesio Total (% MgO)	0,275	0,117	0,112
Cenizas (%)	1,80	4,29	3,73
Manganeso Total (% Mn)	0,002	0,003	0,017
Cobre Total (% Cu)	0,001	0,001	0,002
Cinc Total (% Zn)	0,002	0,002	0,074
Hierro Total (% Fe)	0,010	0,048	0,081
Azufre Total (% S)	0,480	1,485	1,158
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	0,4371	0,8190	0,2594
Silicio Total (%SiO <sub>2</sub> )	3,3,6	4,00	5,58
Pérdidas por Volatilización	87,06	83,33	85,81

El análisis del contenido de nitrógeno en las tres muestras estudiadas revela una presencia significativamente baja de este elemento esencial, lo que resalta una limitación importante en su potencial aplicación directa como enmiendas fertilizantes. Específicamente, el cisco de café mostró un contenido de nitrógeno del 0,82%, seguido por la cáscara de palma africana con un 0,44%, y el contenido ruminal bovino presentó el valor más bajo con solo un 0,16%.

**9.1.1.2. Análisis termogravimétrico.** La figura 10 ilustra los gráficos del análisis termogravimétrico de las tres biomásas. En la curva del CC pueden observarse cuatro pérdidas de peso que sufrió el material con la temperatura. La primera pérdida corresponde a la humedad de la muestra. La segunda y tercera pérdida están relacionadas con la materia volátil presente. La cuarta pérdida es el material combustible (carbono fijo). Y, finalmente quedaron las cenizas. Después de la meseta de pérdida de masa que se observa de 600 a 750 °C, se realizó el cambio de atmósfera a aire, en 750 °C, para que se diera la combustión del carbono fijo presente en la muestra, calentando desde 750 a 950 °C, como indica la norma ASTM. Sin embargo, como se muestra en la curva, la pérdida de peso presentada fue de tan solo 0,16 %, indicando que el porcentaje de carbono fijo en el material era poco. A partir de la curva de CC también puede identificarse el rango de temperatura en que se dieron las pérdidas y el porcentaje de peso perdido. En total, la muestra perdió un 97,68 % de su peso inicial, quedando un residuo del 1,4 %.

**Figura 10.**

Análisis del comportamiento térmico de las biomásas de partida



Por otro lado, en la curva, la curva del CRB muestra tres pérdidas de peso que sufrió el material con la temperatura. La primera pérdida corresponde a la humedad de la muestra. La segunda y tercera pérdida están relacionadas con la materia volátil presente. Finalmente quedaron las cenizas. Después de la meseta de pérdida de masa que se observa de 600 a 750 °C, se realizó en 750 °C el cambio al aire para que se diera la combustión del carbono fijo, calentando de 750 a 950 °C. Sin embargo, como muestra la figura 4, a pesar de que se cambió de atmósfera, la pérdida de masa presentada fue del 0,008%, es decir, se mantuvo constante sin presentarse ninguna pérdida de peso, lo cual indica que la muestra no presentaba carbono fijo y por tanto no hubo combustión. A partir de esta curva también puede identificarse el rango de temperatura en que se dieron las pérdidas y el porcentaje de peso perdido. En total, la muestra perdió un 91,15 % de su peso inicial, quedando un residuo del 8,37 %.

Por último, la CP manifiesta dos pérdidas de peso con la temperatura. La primera pérdida corresponde a la humedad que presenta la muestra y la segunda a la materia volátil. Sin embargo, por más que la muestra se calentó hasta 980 °C, bajo nitrógeno, nunca se llegó a un punto en el que la pérdida de peso fuera constante, por esto no se formó la meseta de pérdida de peso, indicando así que a esa temperatura la muestra aún contenía materia volátil. Debido a lo anterior, no fue posible realizar el cambio de atmósfera para que ocurriera la combustión y cuantificar tanto el material combustible como las cenizas, puesto que este análisis debe realizarse cuando la muestra ya no contenga materia volátil. A partir esta curva puede identificarse el rango de temperatura en que se dieron las pérdidas y el porcentaje de peso perdido. En total, hasta los 980 °C, la muestra perdió un 94,96 % de su peso inicial, quedando aún un 4,45 %.

Diversos estudios han establecido que la pérdida de masa observada durante el análisis termogravimétrico está vinculada con la transformación de la matriz lignocelulósica. La

degradación térmica de la biomasa lignocelulósica se caracteriza por ser un proceso complejo que involucra una serie de reacciones químicas que ocurren de manera simultánea. Estas reacciones incluyen la deshidratación, hidrólisis, oxidación, descarboxilación, transglicosilación, despolimerización, fragmentación, reordenamiento, repolimerización, condensación y carbonización. Según Pecha y Garcia-Perez (2015), este conjunto de procesos refleja la diversidad de cambios químicos y estructurales que la biomasa experimenta bajo condiciones de calor intensivo.

En las curva termogravimétricas de las tres biomásas, es posible distinguir distintas etapas asociadas a la descomposición de componentes específicos de la biomasa. Entre 200 y 350 °C, se produce la descomposición del xilano, seguida por la degradación de la celulosa en el intervalo de 350 a 400 °C. Posteriormente, la fase más extensa corresponde a la descomposición de la lignina, la cual se extiende desde los 400 hasta los 600 °C. Este patrón destaca la secuencia y la temperatura crítica en las que cada uno de los principales componentes lignocelulósicos se descompone durante el calentamiento (Akubo et al., 2019).

En la tabla 5 se especifican las diferentes etapas que se llevan a cabo en ciertos rangos de temperatura y su asociación a la descomposición lignocelulósica. En la primera etapa se pierde agua y se volatilizan las moléculas pequeñas. El inicio de la descomposición térmica de las muestras ocurre a partir de los 200°C. Durante esta etapa, se da inicio a la transformación térmica de la biomasa lignocelulósica con la descomposición de las unidades glucosídicas de los biopolímeros presentes en las muestras en agua, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO) y carbón. Hasta alrededor de los 351°C para la cáscara de palma y el contenido ruminal bovino, y de 345°C para el cisco de café, aumenta el grado de despolimerización, principalmente de la hemicelulosa (entre 200–300°C) y de la celulosa (entre 250–380°C). Entre 200 y 380 °C, se produce la descomposición del xilano, un polisacárido hemicelulósico seguido

por la degradación de la celulosa en el intervalo de 350 a 380 °C. Posteriormente, la fase más extensa corresponde a la descomposición de la lignina, la cual se extiende desde los 380 hasta los 1000 °C. (Akubo et al., 2019).

**Tabla 5.**

Eventos térmicos de las muestras analizadas por TGA

<b>Muestra</b>	<b>Etapa 1 (25–200°C) Humedad</b>	<b>Etapa 2 (200–380°C) Hemicelulosa, celulosa</b>	<b>Etapa 3 (380–600°C) Lignina</b>	<b>Etapa 4 (600–1000°C) Lignina</b>
CP	11,19 %	43,99 %	16,89 %	22,88%
CC	7,49 %	52,69 %	36,37 %	1,13 %
CRB	9,79 %	54,41 %	26,58 %	0,57 %

**9.1.1.3. Estructura porosa.** Las propiedades porosas se analizaron teniendo como base la adsorción y desorción de N<sub>2</sub> a 77 K. Los resultados obtenidos se ilustran en la tabla 5 en donde se proporciona información del área superficial BET, volumen de poro y diámetro de poro. Como se evidencia, el área BET de las biomásas es muy baja, lo cual se puede vincular directamente con la carencia de porosidad en cada una de ellas. La literatura científica ha documentado de manera amplia este fenómeno, con numerosos estudios que informan valores similares para diversas biomásas (Sieradzka et al., 2022). Es esencial destacar que estos valores notoriamente bajos también están intrínsecamente ligados al contenido elevado de materia volátil presente en cada biomasa, como se detalla de manera exhaustiva en la tabla.

Al analizar los datos, se evidencia que CC, CP y CRB exhiben porcentajes de pérdida por volatilización significativos, alcanzando cifras notables del 87,06%, 83,33% y 85,81%, respectivamente. Esta alta proporción de materia volátil no solo explica la baja área superficial

BET observada, sino que también subraya la necesidad de abordar estratégicamente la porosidad en las biomásas para optimizar su rendimiento en diversas aplicaciones.

**Tabla 6.**

Área BET y propiedades porosas de las biomásas de partida

Muestra	Área BET ( $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ )	Volumen de poro ( $\text{cm}^3 \text{dm}^{-1}$ )	Diámetro de poro (nm)
CC	0,92	0,00024	4,33
CP	0,74	0,00030	9,17
CRB	2,22	0,00005	29,23

Las isothermas de adsorción y desorción de  $\text{N}_2$  a 77 K en las muestras de CC, CP y CRB proporcionan una idea sobre las propiedades de adsorción de estos materiales. El análisis gráfico revela que las tres muestras presentan niveles notoriamente bajos de volumen adsorbido, lo que corrobora la limitada extensión de sus áreas BET.

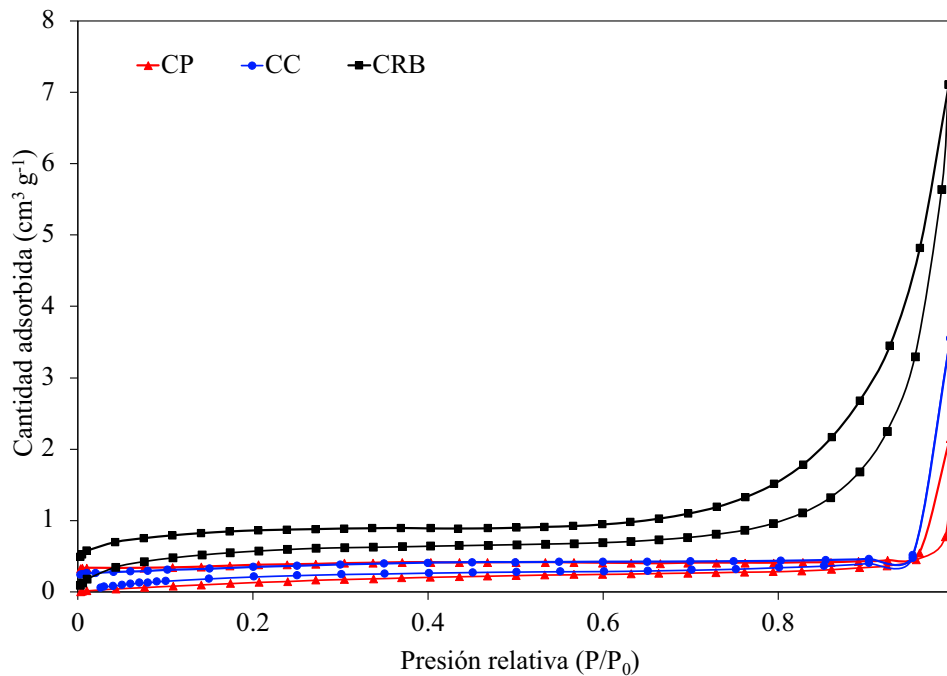
Es relevante destacar que la IUPAC (Unión Internacional de Química Pura y Aplicada), institución reconocida por sus estándares en química, ha establecido una clasificación específica para las isothermas de sistemas sólido-gas, dividiéndolas en seis categorías distintas. Al examinar la figura 11, se evidencia una tendencia marcada hacia las isothermas de tipo V. Este patrón sugiere que la interacción entre el adsorbato y el adsorbente en las muestras de CC, CP y CRB es notablemente débil.

Este fenómeno de interacción débil puede interpretarse como un indicativo de la presencia de sitios de adsorción con una afinidad modesta hacia el nitrógeno a 77K. En consecuencia, se refuerza la conclusión de que las bajas cantidades de volumen adsorbido en estas muestras están vinculadas directamente a sus áreas BET reducidas, lo cual tiene

implicaciones significativas en términos de la capacidad de adsorción y la superficie disponible para las interacciones adsorbato-adsorbente en estos materiales.

### Figura 11.

Isotermas de adsorción y desorción de N<sub>2</sub> de las biomazas de partida



#### 9.1.2. Biocarbones

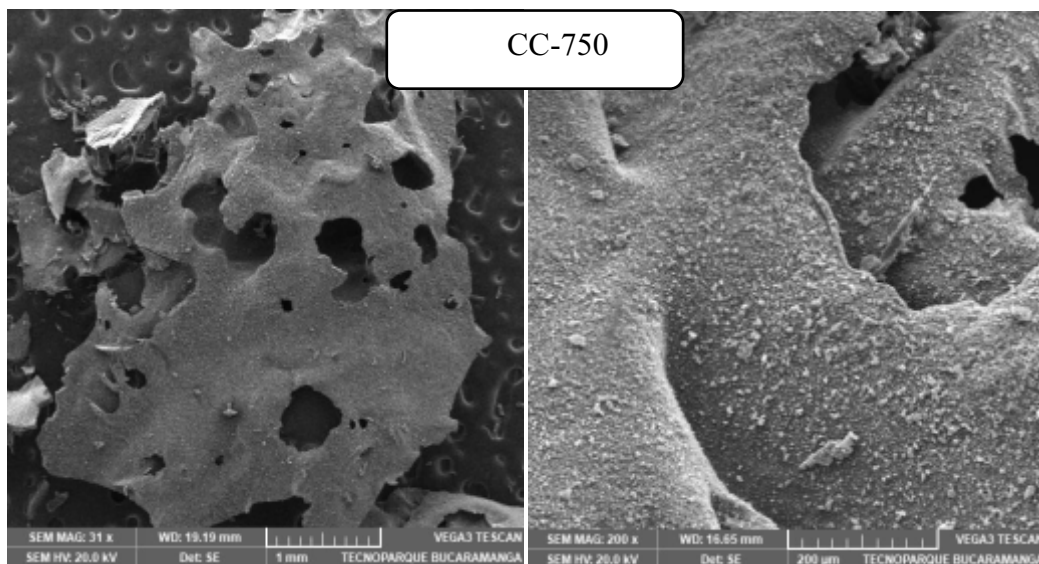
A partir de la CC, CP y CRB se prepararon tres biocarbones a una temperatura de 750 °C. Los biocarbones son productos sólidos ricos en carbono preparados a partir de diferentes tipos de residuos que sufren una conversión térmica. Se ha reportado que los tratamientos termoquímicos mejoran las propiedades porosas, el área superficial y los grupos polares y no polares que se comportan como sitios activos que pueden promover ciertas reacciones químicas (Haider et al., 2022).

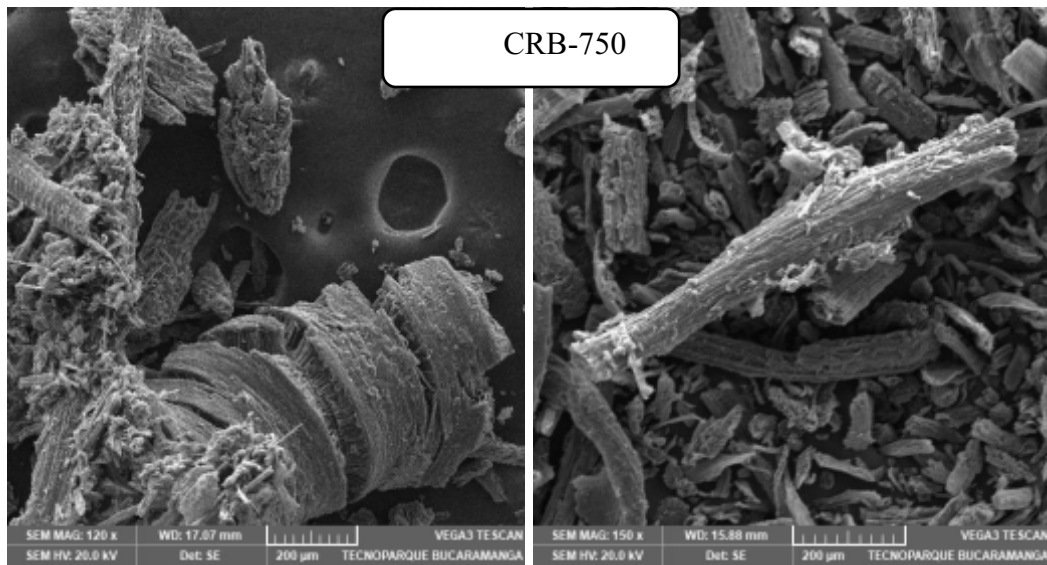
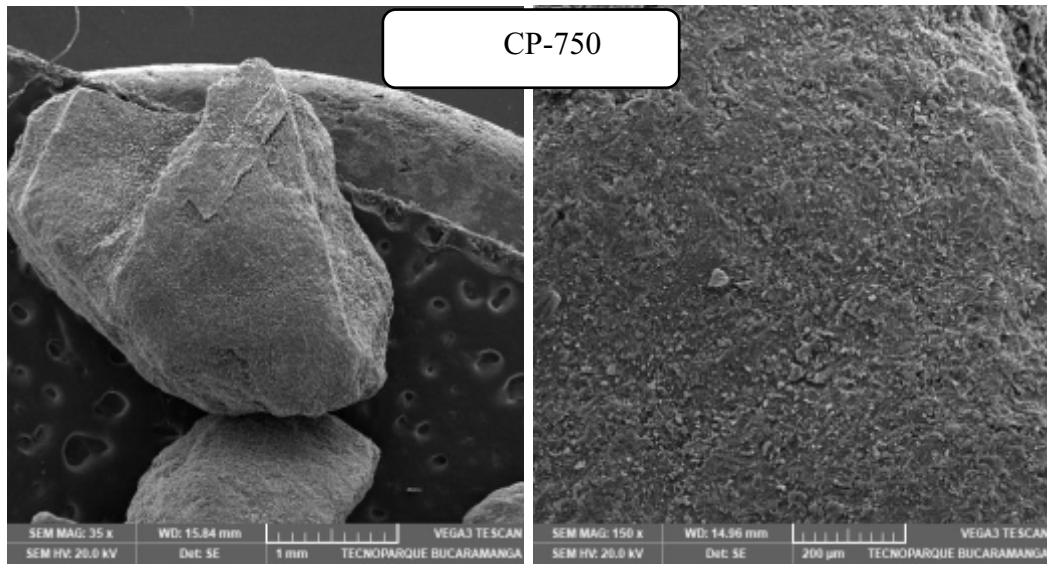
**9.1.2.1. Microscopia electrónica de barrido (SEM).** La observación microscópica revela que los tres biocarbones carecen de características porosas distintivas. En el caso del CC-750, se percibe una formación leve de poros, aunque estos no están bien desarrollados y

no son predominantes. Es importante resaltar que la temperatura pirolítica juega un rol muy importante ya que afecta las propiedades estructurales y fisicoquímicas. Cuando la biomasa se somete a cierta temperatura, el proceso de pérdida de agua y la liberación de materia volátil contribuyen a la formación de la estructura porosa, tan característica de los biocarbones. Sin embargo, cuando la temperatura sobrepasa, esta puede ser contraproducente ocasionando un colapso y sinterización de los poros, o una obstrucción a causa de sustancias como alquitranes que posiblemente se depositaron durante la transformación (Zeng et al., 2015). Estos resultados son consistentes con diferentes estudios en donde se demuestra como altas temperaturas pueden repercutir en la formación de la estructura porosa y área superficial BET. Li et al., 2017 determinó que a 700 °C, parte de la pared de los poros se modifica y colapsa. Este hallazgo resalta la importancia de profundizar en el análisis de las condiciones de transformación y sus efectos sobre la morfología de los biocarbones.

### Figura 12.

Microscopías electrónicas de barrido de los biocarbones





**9.1.2.2. Propiedades fisicoquímicas.** Como se evidencia en la tabla 6, los biocarbones presentan niveles de pH alcalinos en contraste con las biomásas. Estos valores de pH están directamente vinculados con el proceso de conversión de cationes básicos, tales como el Nitrógeno (N), Fósforo (P), Calcio (Ca) y Potasio (K), hacia óxidos, como ha sido destacado por Rawat et al. (2019). Estos resultados se respaldan con el incremento observado en el porcentaje de estas fracciones inorgánicas en los biocarbones. Además, se evidenció un notable aumento de la conductividad del CC al someterlo a pirólisis, elevando su valor de 316 a 7790  $\mu\text{S cm}^{-1}$ . Investigaciones anteriores que abordaron la preparación de biocarbón a partir de residuos de café a una temperatura de 1000 °C reportaron una conductividad de 300  $\text{S m}^{-1}$ , atribuida al proceso de carbonización y grafitización (Jeong et al., 2022).

Así mismo, en la tabla 6 se constata un incremento en el porcentaje de cenizas en los tres biocarbones, lo que guarda relación con el aumento del contenido de nutrientes disponibles incluyendo N, P y K para los biocarbones. La retención o liberación de elementos esenciales como N, P y K durante la transformación de las biomásas está intrínsecamente vinculada a las condiciones operacionales específicas bajo las cuales se lleva a cabo el proceso. Estas condiciones incluyen la temperatura, el tiempo de residencia, la velocidad de calentamiento y la atmósfera de reacción, entre otros factores críticos.

En el contexto de las biomásas, el nitrógeno se encuentra en diversas formas, incluyendo aminoácidos, aminoazúcares y nitrógeno inorgánico. Durante la transformación pirolítica de la biomasa, es decir, su descomposición térmica en ausencia de oxígeno y a altas temperaturas, una fracción del nitrógeno presente se libera en forma de compuestos volátiles, tales como cianuro de hidrógeno (HCN), NO y NH<sub>x</sub>. Este proceso ocurre bajo condiciones de alta temperatura que provocan la ruptura de los enlaces N-H, lo que resulta en la generación de una serie de radicales libres de hidrógeno (Shi et al., 2023).

El nitrógeno que no se libera durante este proceso y que se retiene en la estructura de los biocarbones sufre una transformación, integrándose en compuestos aromáticos heterocíclicos, como las estructuras tipo piridina. Estas estructuras confieren a los biocarbones características químicas específicas, incluyendo una mayor estabilidad y capacidad de adsorción, lo que puede influir significativamente en sus aplicaciones potenciales, como la remoción de contaminantes o como sustratos en reacciones químicas.

**Tabla 7.**

Análisis fisicoquímico de los biocarbones

<b>Parámetros</b>	<b>CC-750</b>	<b>CP-750</b>	<b>CRB-750</b>
pH	10,30	9,20	9,50
Conductividad ( / )	7790	225	248
Nitrógeno total (%N)	1,559	0,581	1,442
Humedad (%)	3,64	3,15	0,78
Potasio total(%K <sub>2</sub> O)	2,033	0,249	0,406
Carbono orgánico total oxidable (%C)	0,97	0,01	15,90
Fósforo total (%P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0,311	0,455	0,653
Sodio total (%Na)	0,155	0,099	0,299
Calcio total (%CaO)	2,252	0,210	2,576
Magnesio Total (% MgO)	0,627	0,302	0,386
Manganeso Total (% Mn)	0,024	0,006	0,046
Cobre Total (% Cu)	0,006	0,003	0,005
Cinc Total (% Zn)	0,012	0,002	0,015
Hierro Total (% Fe)	0,467	0,672	0,778
Azufre Total (% S)	0,262	0,262	0,312
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	0,380	0,706	0,384
Silicio Total (%SiO <sub>2</sub> )	6,528	3,684	16,00
Pérdidas por Volatilización	84,70	90,48	60,14

**9.1.2.3. Análisis elemental.** La composición elemental de los biocarbones está intrínsecamente ligada tanto al tipo de biomasa de origen como a las condiciones específicas de temperatura bajo las cuales se realiza el proceso de pirólisis. Dicho proceso transforma la biomasa mediante tratamiento térmico en ausencia de oxígeno, resultando en una concentración de carbono significativamente mayor en el producto final. A modo de ejemplo, los biocarbones denominados CC-750, CP-750 y CRB-750 demuestran porcentajes de carbono de 75,4%, 74,2% y 58% respectivamente, con el CC-750 destacando por tener el mayor contenido de carbono entre los mencionados.

La temperatura de pirólisis es un factor determinante en la composición elemental final de los biocarbones. Al incrementarse la temperatura, se facilita la liberación de materia volátil y la emisión de gases como dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), monóxido de carbono (CO), vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) e hidrocarburos volátiles, lo que a su vez enriquece el material residual con estructuras aromáticas. Estas estructuras son consideradas un indicativo de la estabilidad térmica y química de los biocarbones, ofreciendo beneficios en diversas aplicaciones, especialmente aquellas que requieren durabilidad y resistencia a la degradación.

El índice de aromaticidad, representado por la relación atómica H/C, es empleado como una medida de la presencia de compuestos aromáticos en los biocarbones, donde valores más bajos sugieren un mayor grado de aromaticidad. De acuerdo con los criterios establecidos por la Iniciativa Internacional del Biocarbón (IBI), para que un biocarbón sea considerado adecuado para ciertas aplicaciones, el ratio molar  $\text{H}/\text{C}_{\text{org}}$  debe ser igual o inferior a 0,7. En este contexto, el CP-750 resalta por ser el único que supera este umbral, sugiriendo una menor aromaticidad en comparación con los otros biocarbones analizados.

Además, la relación O/C se asocia con la presencia de grupos funcionales oxigenados en los biocarbones. Esta relación tiende a disminuir después del proceso de carbonización, debido a reacciones químicas como la deshidratación que ocurre durante la pirólisis. La reducción en los grupos oxigenados contribuye a disminuir la hidrofiliidad de la superficie de los biocarbones.

**Tabla 8.**

Análisis elemental de los biocarbones

Muestras	C(%)	H(%)	N(%)	S(%)	O(%)	%cenizas	H/C	O/C	N/C
CC-750	75,4	2,9	1,6	0,1	8,34	11,66	0,46	0,08	0,02
CP-750	74,2	6,4	0,6	2,0	10,43	6,37	1,04	0,11	0,01
CRB-750	58	2,4	2,2	0,2	1,12	36,08	0,50	0,01	0,03

**9.1.2.4. Estructura porosa.** La determinación del área superficial en los biocarbones es esencial, ya que esta propiedad está estrechamente ligada a su capacidad de adsorción, lo que impacta directamente en su eficacia en diversas aplicaciones. La influencia del tipo de biomasa y el método de transformación en esta área superficial ha sido objeto de estudio. Al analizar los resultados del área superficial utilizando el método BET (Brunauer-Emmett-Teller), se ha observado una tendencia interesante. Como se puede observar en la tabla 7, en los casos de los biocarbones derivados de las biomásas CC y CP, se evidencia una disminución en su área BET en comparación con las biomasa originales. Este fenómeno sugiere que el proceso de transformación aplicado en estos casos podría estar asociado con una reducción en la porosidad. Por otro lado, en el caso del biocarbón producido a partir de la biomasa CRB, se observa un fenómeno contrario. El área superficial, medida inicialmente en 2,22, se incrementó a 3,00.

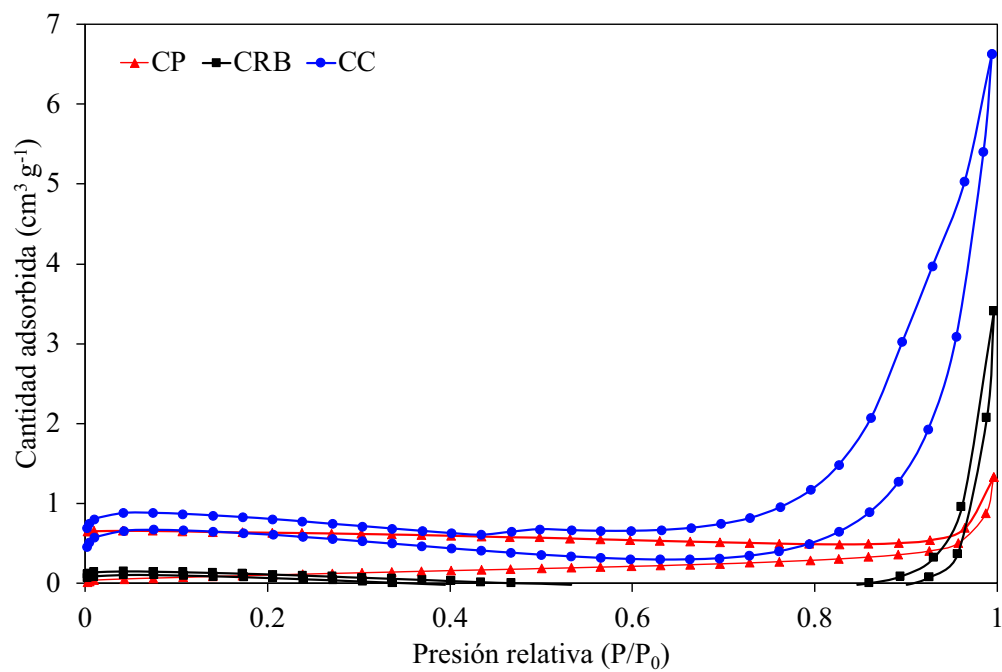
Normalmente, el proceso de pirólisis contribuye a la descomposición de la celulosa, hemicelulosa y lignina y por ende a la formación de los canales porosos contribuyendo al área BET. Sin embargo, en este caso, hubo una disminución del área BET. Existen estudios en donde se estudia la temperatura pirolítica y la biomasa de partida empelada encontrándose que a cierta temperatura puede llevarse a cabo un fenómeno denominado desactivación termal que puede resultar en un ordenamiento estructural y fusión de los poros. Durante este proceso, gran cantidad de poros se pueden bloquear y consecuentemente el área BET y volumen de poro disminuyen (Zeng et al., 2015).

**Tabla 9.**

Área BET y propiedades porosas de los biocarbones

Muestra	Área BET ( $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ )	Volumen de poro ( $\text{cm}^3 \text{dm}^{-1}$ )	Diámetro de poro (nm)
CC-750	0,40	0,0014	47,11
CP-750	0,50	0,0013	10,96
CRB-750	3,00	0,0014	33,30

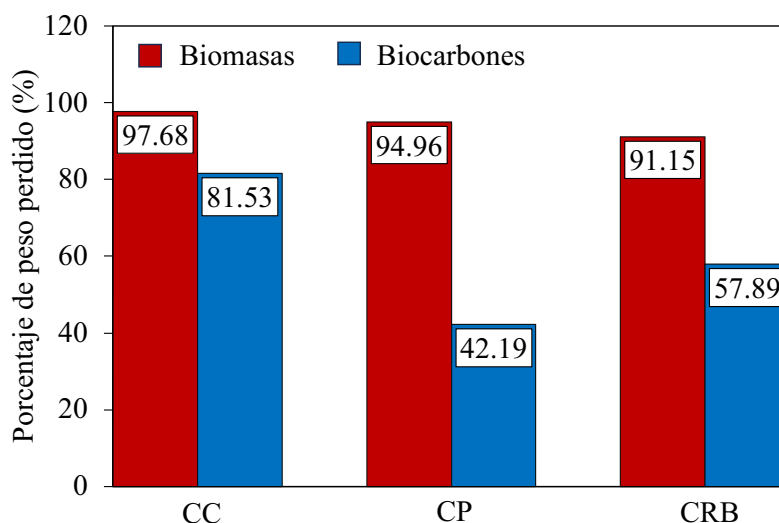
Hay otros estudios, que relacionan esas bajas áreas BET con el contenido de materiales inorgánicos y el porcentaje de cenizas, que parcialmente pueden bloquear y rellenar los poros (Ghysels et al., 2019).

**Figura 13.**Isotermas de adsorción y desorción de N<sub>2</sub> de los biocarbones

**9.1.2.5. Análisis termogravimétrico (TGA).** El análisis termogravimétrico de los biocarbones se presenta como una herramienta esencial para la evaluación de su estabilidad térmica, un parámetro crítico en su aplicación en entornos como suelos o cuerpos de agua. La estabilidad térmica de estos materiales adquiere una relevancia fundamental dado su potencial uso en diversas aplicaciones medioambientales y tecnológicas. El TGA proporciona una comprensión detallada de cómo los biocarbones responden a cambios de temperatura, lo que permite determinar su resistencia a la descomposición térmica y su capacidad para mantener sus propiedades estructurales e químicas bajo condiciones de calor. En la figura 14, se puede observar el contraste de la variabilidad térmica entre las biomásas y los biocarbones en donde estos últimos exhiben una notable estabilidad y resistencia frente a elevadas temperaturas. Esta característica distintiva es fundamental en el ámbito de la bioenergía y la ingeniería ambiental, donde los biocarbones se destacan como una alternativa de gran promesa debido a su capacidad para mantener integridad estructural y composición química frente a condiciones térmicas extremas. Esta resistencia térmica superior de los biocarbones los posiciona como materiales altamente deseables en aplicaciones donde se requiere una durabilidad excepcional bajo estrés térmico, como en la producción de energía a partir de biomasa, la remediación de suelos contaminados o la purificación de aguas residuales.  $\text{mg L}^{-1}$ .

**Figura 14.**

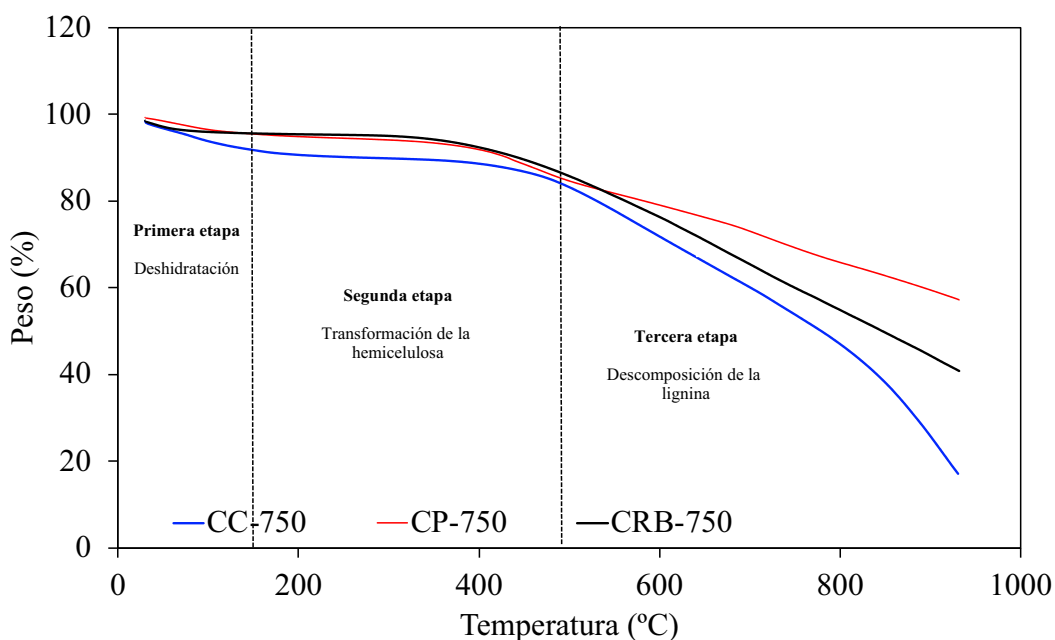
Comparación de porcentaje de peso perdido determinado por TGA de las biomásas y los biocarbones



En la Figura 15 pueden observarse las curvas de CC-750, CP-750 y CRB-750, estas tienen comportamientos similares exhibiendo dos pérdidas de peso en función de la temperatura. La primera pérdida corresponde a la humedad de la muestra y la segunda a la materia volátil. Sin embargo, por más que las muestras se calentaron bajo nitrógeno hasta las condiciones máximas del equipo, nunca se llegó a un punto en el que la pérdida de peso fuera constante. Por tanto, no se formó la meseta de pérdida de peso, indicando así que a esta temperatura la muestra aún contenía materia volátil. Debido a lo anterior, no fue posible realizar el cambio de atmósfera para que ocurriera la combustión y cuantificar tanto el material combustible como las cenizas. Esto, debido a que este análisis debe realizarse cuando la muestra ya no contenga materia volátil. A partir de la curva de CRB-750 también pudo identificarse el rango de temperatura en que se dieron las pérdidas y el porcentaje de peso perdido. En total, la muestra CRB-750 perdió un 57,89 % de su peso inicial, quedando un residuo del 40,66 %, el CP-750 perdió un 42,19 % de su peso inicial, quedando un residuo del 57,10 % y el CC-750 un 81,53 % de su peso inicial, quedando un residuo del 16,83 %. El biocarbón con mayor estabilidad es el CP-750.

**Figura 15.**

Análisis



## 9.2. Aplicaciones

### 9.2.1. Remoción de contaminantes de un medio acuoso

#### 9.2.1.1. Azul de metileno (AM)

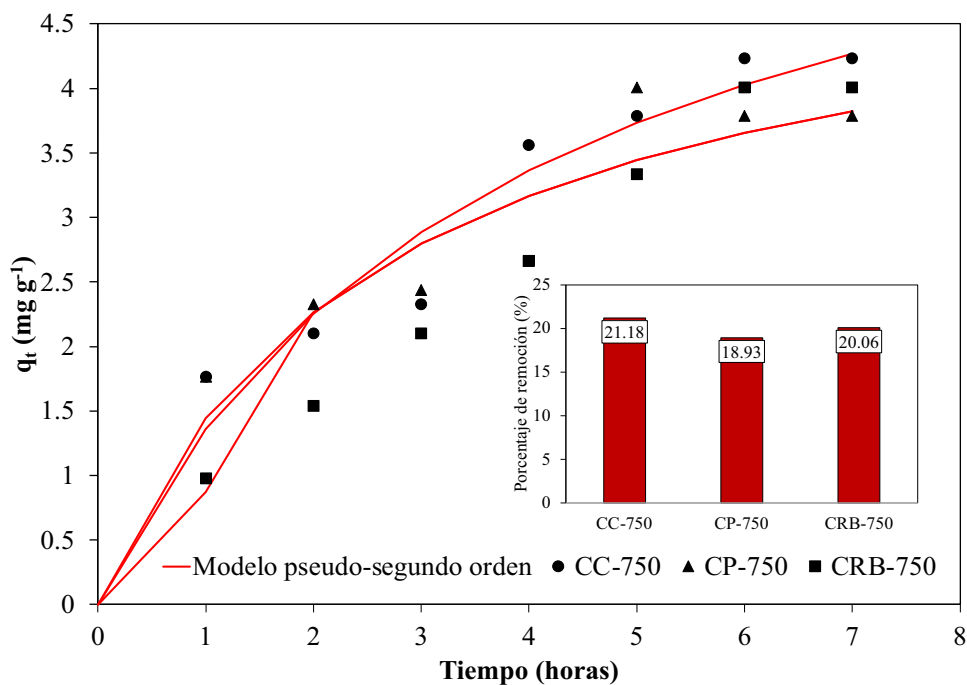
**9.2.1.1.1. Cinética de adsorción del azul de metileno.** En el estudio sobre la capacidad de adsorción de los biocarbones derivados de cisco de café (CC-750), cascarilla de palma (CP-750), y contenido ruminal bovino (CRB-750), se puso especial atención en la eliminación del azul de metileno del agua. Esta evaluación es crucial, dada la relevancia de eliminar contaminantes orgánicos de las aguas residuales, en este caso, un colorante industrial que representa un riesgo ambiental y para la salud pública. Para comprender la dinámica de este proceso de adsorción, se ajustaron los resultados experimentales a dos modelos cinéticos fundamentales: el modelo de pseudo-primer orden y el modelo de pseudo-segundo orden.

El ajuste de los datos experimentales a los modelos cinéticos se visualiza en la Figura 16. De este análisis se puede observar que los resultados experimentales presentan una correlación significativamente más estrecha con el modelo de pseudo-segundo orden. Lo que sugiere que los mecanismos de adsorción predominantes son de naturaleza química, más que física. Sin embargo, estos ajustes no son determinantes y por lo general en los procesos de adsorción se llevan a cabo una combinación de mecanismos de remoción químicos y físicos. Los datos experimentales que mejor se ajustaron al modelo de pseudo-segundo orden fueron los de la CP-750 con un coeficiente de correlación de 0,8744. Además, el tiempo en el que los tres materiales llegaron al equilibrio fue de 6 horas. Dentro de la figura 16, se graficaron los porcentajes de remoción en el tiempo en el equilibrio para cada uno de los biocarbones. La eficacia en la remoción de contaminantes observada para los biocarbones CC-750, CP-750 y CRB-750 fue relativamente baja, registrándose porcentajes de 21,18%, 18,93% y 20,06% respectivamente. Este patrón de rendimiento limitado puede estar intrínsecamente asociado a

las características físicas de los materiales, específicamente a su baja área superficial BET. La superficie disponible para la adsorción en cada uno de estos biocarbones es un factor crítico que determina su capacidad para capturar y retener moléculas contaminantes. El área superficial BET, que mide la extensión total accesible a los adsorbatos, juega un papel fundamental en los procesos de adsorción. Una mayor área superficial implica más sitios activos disponibles para la interacción con las moléculas, lo cual puede traducirse en una mayor eficiencia de remoción.

**Figura 16.**

Cinética de adsorción del azul de metileno

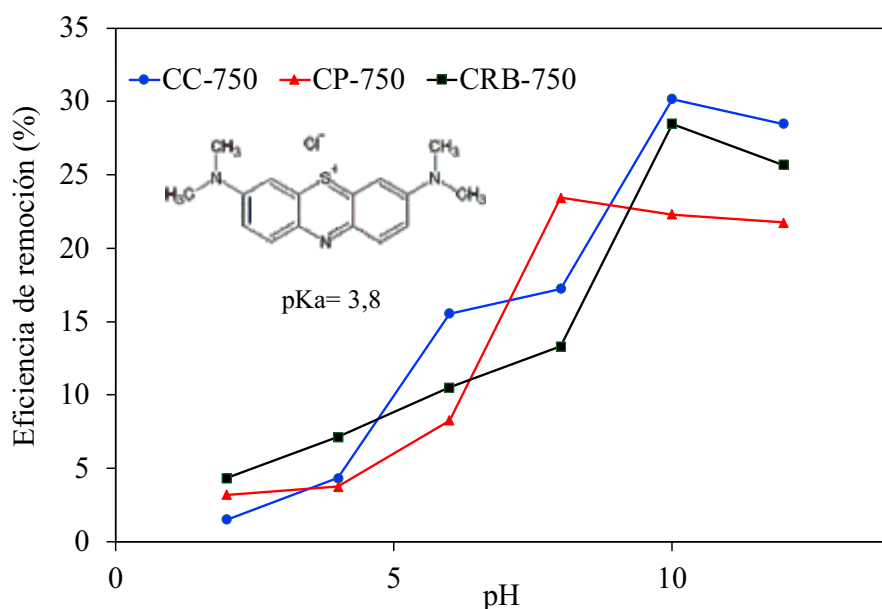


**9.2.1.1.2. Efecto del pH en la adsorción de azul de metileno.** El análisis del gráfico revela que la eficiencia en la remoción de contaminantes por parte de los biocarbones incrementa a medida que aumenta el pH del medio. Esta observación es crucial para determinar el pH óptimo en que se presentan los mayores porcentajes de remoción por parte de los biocarbones CC-750, CP-750 y CRB-750, siendo estos pH óptimos de 10 (30,17), 8 (23,43%) y 10 (28,48%), respectivamente. Este fenómeno se explica por la variación en la carga superficial de los biocarbones en respuesta a cambios en el pH. A pHs bajos, la superficie de los biocarbones tiende a protonarse  $H^+$ , adquiriendo una posible carga positiva que disminuye su capacidad de interacción con especies catiónicas. Por el contrario, en condiciones alcalinas, la superficie se desprotona, adquiriendo posibles características negativas que favorece la atracción electrostática con cationes.

Dado que el pKa del azul de metileno (AM) es de 3.8, en la mayoría de las condiciones ambientales, las especies de AM existirán predominantemente en forma catiónica. Por lo tanto, bajo condiciones alcalinas, donde el biocarbón se encuentra desprotonado se facilita la interacción electrostática con las moléculas catiónicas de AM, mejorando la eficiencia de remoción (Hammud et al., 2023).

### Figura 17.

Efecto del pH en la eficiencia de remoción del azul de metileno

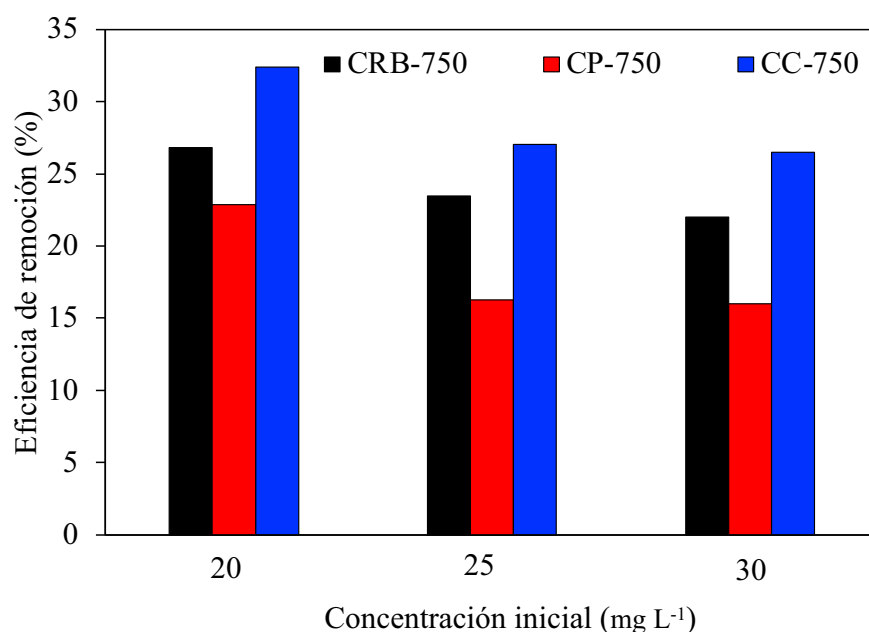


**9.2.1.1.3. Efecto de la concentración inicial en la adsorción de azul de metileno.** La evaluación de la concentración inicial del azul de metileno emerge como otro factor crucial en el estudio de la capacidad de remoción de contaminantes por parte de los biocarbones. Se ha observado que a medida que se incrementa la concentración inicial de este contaminante en la solución, la eficiencia de remoción por parte de los biocarbones CC-750, CP-750, y CRB-750 muestra una tendencia descendente. Este fenómeno puede ser atribuido a una saturación progresiva de los sitios de adsorción disponibles en la superficie de los biocarbones.

A bajas concentraciones de AM, existe una abundancia relativa de sitios de adsorción en comparación con las moléculas de AM presentes, facilitando así una mayor eficiencia de remoción. Sin embargo, conforme la concentración de AM aumenta, la competencia por estos sitios de adsorción se intensifica, llegando a un punto en el que la capacidad de adsorción del material se ve sobrepasada, resultando en una disminución de la eficiencia de remoción (Wang et al., 2022).

**Figura 18.**

Efecto de la concentración inicial de azul de metileno en su porcentaje de remoción

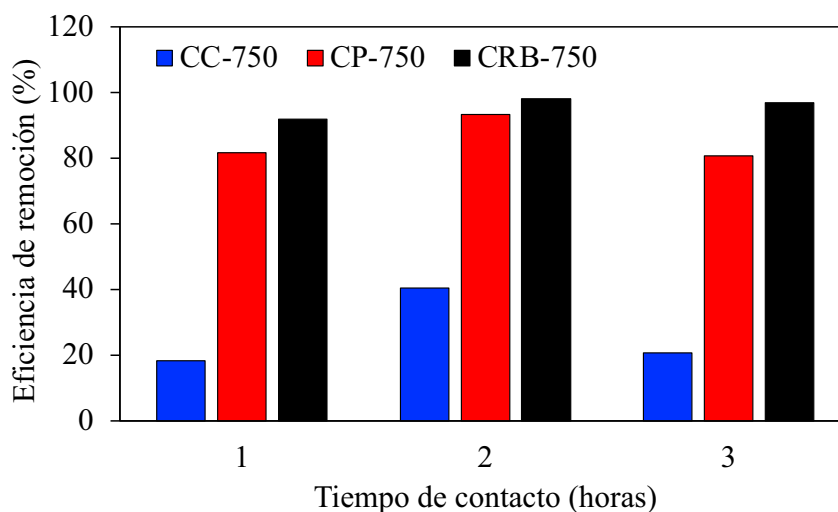


**9.1.1.2. Plomo (II).** La literatura ha dedicado una atención considerable al estudio del impacto de diversos biocarbones derivados de una variedad de biomásas en la eliminación de Pb (II) del medio ambiente. Estos materiales han captado el interés de los investigadores debido a sus propiedades fisicoquímicas particulares, las cuales los hacen altamente efectivos en la remoción de contaminantes como el plomo. Este enfoque se ha explorado con el objetivo de comprender mejor cómo estos biocarbones pueden ser empleados de manera más eficiente y sostenible para abordar los desafíos asociados con la contaminación por Pb (II).

**9.1.1.2.1. Cinética de adsorción de  $Pb^{2+}$ .** La figura 19 presenta los resultados de un ensayo cinético llevado a cabo durante un período de 3 horas, con toma de muestras cada hora. Los datos revelan que los porcentajes de remoción más destacados se alcanzaron a las dos horas de inicio del ensayo. En concreto, se registraron porcentajes de remoción del 40,44%, 93,33% y 97,98% para los biocarbones CC-750, CP-750 y CRB-750, respectivamente. Este hallazgo sugiere que las propiedades y características de estos biocarbones en particular los hacen altamente efectivos en la eliminación del contaminante estudiado en un tiempo relativamente corto, lo que podría ser de gran interés para aplicaciones prácticas en la remediación ambiental.

**Figura 19.**

Efecto del tiempo de contacto en la eficiencia de remoción del plomo (II)

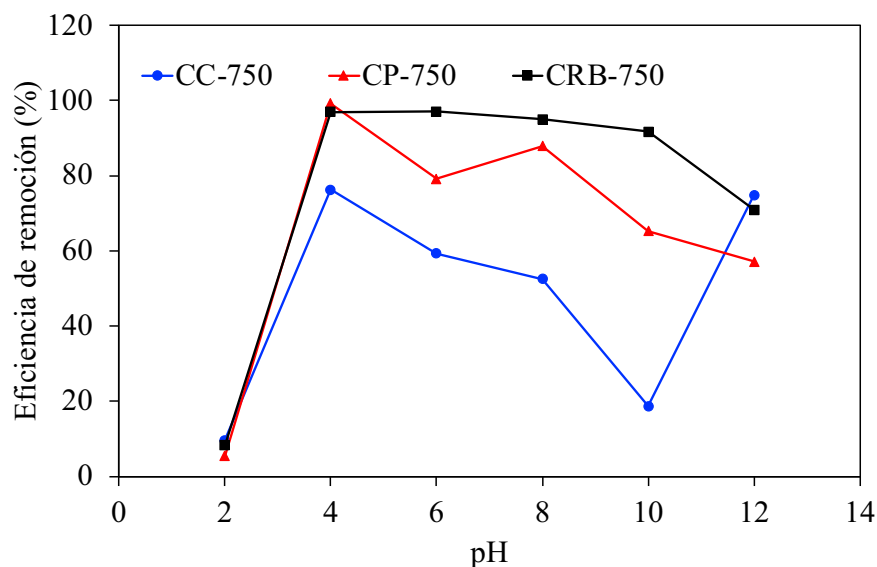


9.1.1.2.2. Efecto del pH en la adsorción de  $Pb^{2+}$ . El pH juega un papel crucial en la remoción del contaminante, ya que tanto los biocarbones como el contaminante modelo adquieren propiedades químicas específicas que afectan sus respectivos mecanismos de remoción en el medio acuoso. Se ha observado que a pH mayores a 6, se forma el precipitado;  $Pb(OH)_2$  en el medio, lo que podría influir en la eficiencia de remoción. Por este motivo, se recomienda mantener los rangos de pH entre 5 y 6 (Yang et al., 2023), ya que estos valores proporcionan condiciones favorables para la remoción del contaminante sin que se vea afectada por la formación de precipitados.

Los resultados sobre la influencia del pH se presentan en la figura 20. Como se puede apreciar, los valores óptimos de pH, donde se logran los mayores porcentajes de remoción, son 4, 4 y 6 para los biocarbones CC-750, CP-750 y CRB-750, respectivamente. A pH muy bajos, las especies  $H^+$  compiten con el  $Pb^{2+}$  por los sitios activos de los biocarbones, lo que conduce a una reducción considerable en la eficacia de la remoción. No obstante, a pH más altos, este fenómeno no es tan predominante, lo que favorece la adsorción del contaminante. Es importante destacar que el equilibrio entre estas interacciones ácido-base en la superficie de los biocarbones juega un papel crucial en su capacidad para adsorber y retener el plomo, lo que influye directamente en la eficiencia del proceso de remoción.

**Figura 20.**

Efecto del pH en la remoción de  $Pb^{2+}$

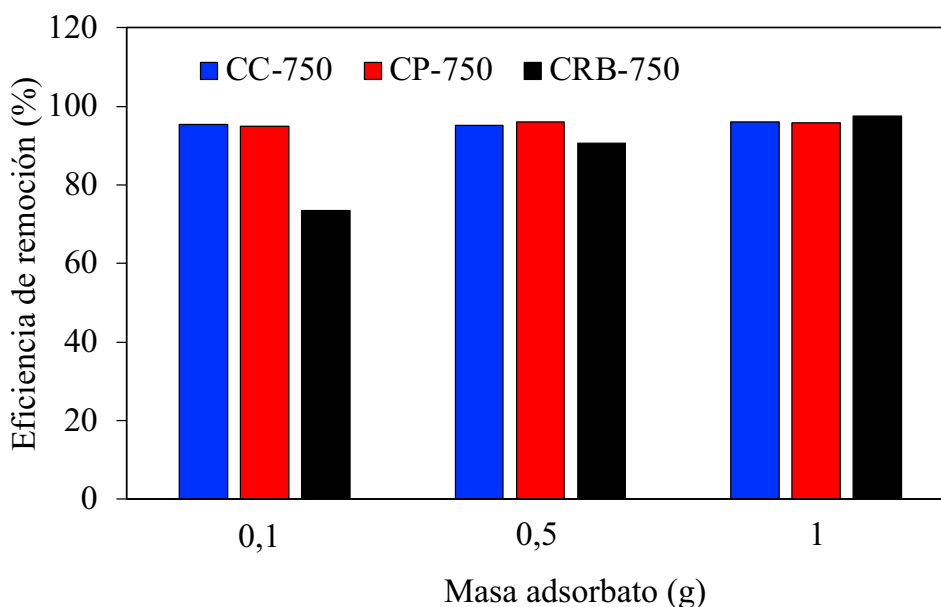


9.1.1.2.3. Efecto de la dosis de los biocarbones y la concentración inicial de  $Pb^{2+}$  en la adsorción. Las figuras 21 y 22 ofrecen una visión detallada de cómo la dosis de los biocarbones CC-750, CP-750 y CRB-750, así como la concentración inicial de  $Pb^{2+}$ , influyen en el porcentaje de remoción del contaminante. En la figura 21, los ensayos se llevan a cabo utilizando una concentración inicial de  $10\text{ mg L}^{-1}$ , ya que se ha observado que esta concentración conduce a las eficiencias de remoción más altas.

A pesar de las variaciones en la dosis del adsorbente, se observa que en general no se producen cambios significativos en la remoción del  $Pb^{2+}$  del medio acuoso. En su mayoría, todas las dosis muestran valores altos de remoción, con la excepción del ensayo que utiliza 0,1 g de CP-750, el cual muestra una eficiencia de remoción del 73,44%. Este hallazgo sugiere que, dentro del rango de dosis probadas, el exceso o la escasez de biocarbon no afectan considerablemente la capacidad de remoción del contaminante, destacando la eficacia de estos materiales en la eliminación del  $Pb^{2+}$  independientemente de la cantidad utilizada. Los mejores valores se obtienen empleando 1 g de adsorbato, lo que sugiere que al aumentar la dosis, aumentan los sitios activos influyendo así en las mejoras en la remoción.

**Figura 21.**

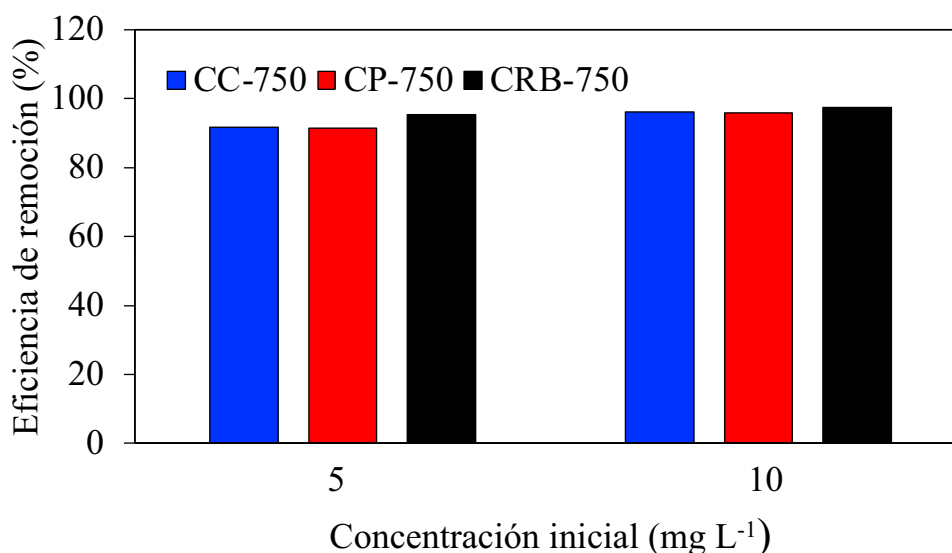
Efecto de la masa de los biocarbones en la eficiencia de remoción de  $Pb^{2+}$



La figura 22 representa cómo la concentración inicial afecta la remoción de  $Pb^{2+}$ . Se observa que los mejores resultados se alcanzan a una concentración inicial de  $10\text{ mg L}^{-1}$ , con eficiencias de remoción del 96,06%, 95,77% y 97,52% para CC-750, CP-750 y CRB-750, respectivamente. Este hallazgo sugiere que esta concentración particular proporciona condiciones óptimas para la adsorción y retención del  $Pb^{2+}$  por parte de los biocarbones evaluados. Además, podría indicar la saturación de los sitios de adsorción activos a concentraciones más altas o una competencia excesiva por parte de otros componentes presentes en la solución, lo que reduce la eficacia de la remoción.

**Figura 22.**

Efecto de la concentración inicial  $Pb^{2+}$  en la eficiencia de remoción



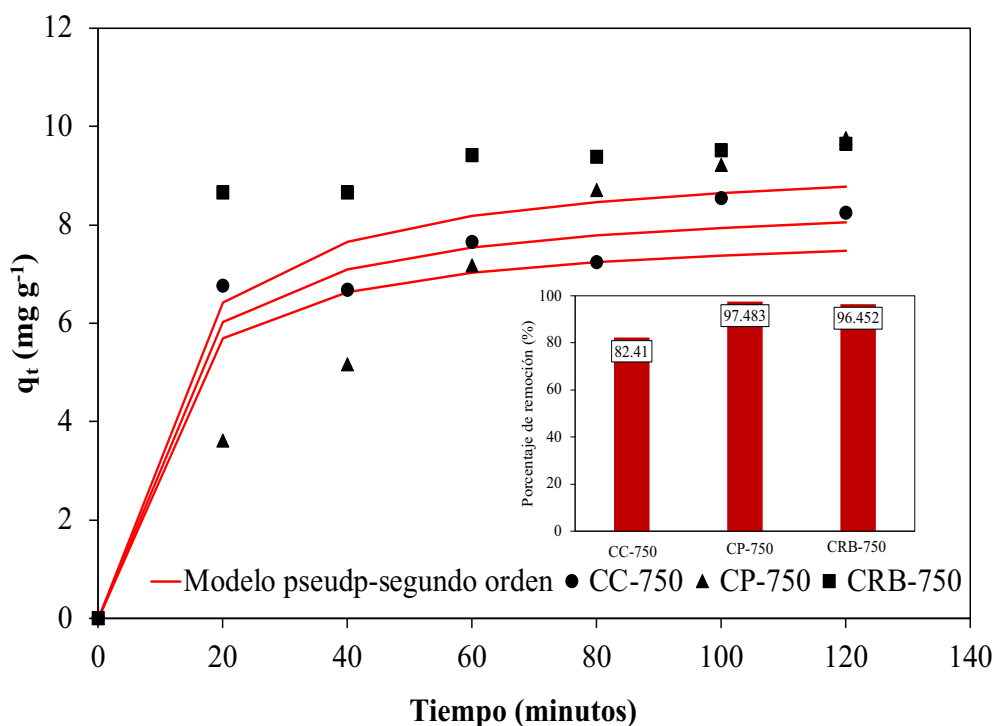
**9.1.1.2.4. Cinética final de adsorción de  $Pb^{2+}$ .** Finalmente, se realizó un estudio de cinética de adsorción que integró todos los parámetros investigados anteriormente: pH, dosis de adsorbente y concentración inicial de  $Pb^{2+}$ . Mediante los análisis cinéticos realizados, se determinó que el modelo de pseudo-segundo orden se ajustaba mejor a los datos

experimentales. Los valores finales de los porcentajes de remoción resultaron ser 82,41%, 97,48% y 96,45% para CC-750, CP-750 y CRB-750, respectivamente.

Este resultado sugiere que los mecanismos de remoción predominantes están relacionados con procesos de naturaleza química, específicamente mediante la formación de enlaces covalentes. No obstante, también se identificaron otras interacciones de tipo físico que contribuyen al mecanismo de adsorción. Este hallazgo subraya la complejidad de los procesos de adsorción en este sistema y destaca la importancia de considerar múltiples factores y mecanismos para comprender completamente la eficacia de los biocarbones en la remoción de  $Pb^{2+}$  del medio acuoso.

**Figura 23.**

Cinética de adsorción final con todos los parámetros optimizados



**9.2.2. Evaluación del potencial de los biocarbones como combustibles sólidos.** En la Tabla 8 se presentan los resultados relacionados con el poder calorífico de los biocarbones. Al analizar estos datos, se destaca que el biocarbón CP-750 muestra una mayor capacidad de liberación de calor superior en comparación con los otros dos. Este hallazgo sugiere que el biocarbón CP-750 podría ser una opción preferida en aplicaciones donde se requiere una alta generación de calor. Para profundizar en la significancia de este resultado, sería beneficioso explorar más a fondo las características y propiedades del CP-750 en relación con su composición, proceso de fabricación y potenciales aplicaciones prácticas. Además, investigar el impacto ambiental y económico de su producción y uso podría ofrecer una comprensión más completa de su viabilidad como una fuente de energía alternativa.

**Tabla 10.**

Poder calorífico de los biocarbones

<b>Muestras</b>	<b>PCS (kJ kg<sup>-1</sup>) promedio</b>
CC-750	25,820 ± 46
CP-750	28,096 ± 159
CRB-750	18,921 ± 137

Además de analizar el poder calorífico, se llevó a cabo un estudio detallado sobre la capacidad de consumo y las temperaturas alcanzadas por los biocarbones en un período específico de tiempo. Estos experimentos revelaron datos significativos: el biocarbón CRB-750 alcanzó una temperatura máxima de 60 °C a los 20 minutos, mientras que el biocarbón CC-750 y CP-750 mostraron tiempos de consumo de 40 y 20 minutos respectivamente, alcanzando temperaturas de 54 y 52 °C. Estos resultados sugieren diferencias importantes en la eficiencia y capacidad de generación de calor entre los diferentes tipos de biocarbones estudiados. Para

profundizar en la interpretación de estos hallazgos, podría ser valioso examinar cómo estas variaciones en la temperatura y el tiempo de consumo pueden influir en su utilidad práctica en diversas aplicaciones industriales o domésticas. Asimismo, sería interesante investigar las posibles causas de estas disparidades en el comportamiento térmico de los biocarbones, como diferencias en la composición química, la densidad o la estructura física de los materiales. Esto proporcionaría una comprensión más completa de las características y el rendimiento de cada tipo de biocarbón, lo que podría ser crucial para su aplicación efectiva en diferentes contextos (Liu et al., 2013).

**Tabla 11.**

Combustión de los biocarbones

<b>Tiempo (minutos)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>		
	<b>CC-750</b>	<b>CP-750</b>	<b>CRB-750</b>
0	25	22	23
5	44	40	44
10	58	42	50
15	70	48	56
20	76	52	60
25	72	-	58
30	64	-	-
35	56	-	-
40	54	-	-

## 10. Conclusiones

Esta investigación se centró en el empleo de tres tipos de biomasa lignocelulósica: el cisco de café (CC), la cáscara de palma (CP) y el contenido ruminal bovino (CRB), con el objetivo de convertirlos en biocarbones mediante un proceso de pirólisis lenta a una temperatura de 750 °C. Los análisis de caracterización realizados a estos biocarbones revelan una notable mejora en la estabilidad térmica en comparación con las materias primas originales. Interesantemente, se observó un incremento en el contenido de cenizas de los biocarbones, indicativo de un aumento en la proporción de componentes inorgánicos tales como nitrógeno (N), fósforo (P), calcio (Ca) y potasio (K).

Sin embargo, las micrografías obtenidas de los biocarbones muestran una estructura porosa poco desarrollada, y los análisis de área superficial BET indican valores bajos. Estos hallazgos sugieren que la temperatura de pirólisis aplicada podría estar obstruyendo los poros o incluso afectando negativamente su formación, lo que tiene implicaciones directas en las propiedades físicas del material final.

Además, se exploró la capacidad de estos biocarbones para adsorber el azul de metileno (AM) y plomo ( $Pb^{2+}$ ), descubriendo una sorprendente afinidad por el plomo, con capacidades de adsorción que alcanzaron los valores máximos de 82,41%, 97,48% y 96,45% tras dos horas de tiempo de contacto. Este resultado abre la puerta a potenciales aplicaciones de estos materiales en la purificación de aguas contaminadas con metales pesados.

Finalmente, al evaluar su potencial como alternativa a los combustibles fósiles, se encontró que el biocarbón CRB-750 logra alcanzar una temperatura máxima de 60°C en un tiempo de 20 minutos, superando a CC-750 y CP-750. Este desempeño térmico destaca la viabilidad de estos biocarbones como fuente de energía renovable, aunque se reconoce la

necesidad de profundizar en la optimización de sus propiedades porosas para maximizar su eficiencia energética. Este estudio arroja luz sobre el potencial de las biomásas lignocelulósicas como precursores de biocarbones con aplicaciones ambientales y energéticas.

**Referencias Bibliográficas**

Ábrego Garrués, J. (2010). *Energía de la biomasa. Volumen I* (F. Sebastián Nogués, D. Garcia-Galindo, & A. Rezeau, Eds.). Prensas Universitarias de Zaragoza.

Allouch, M., Hadey, C., & Mohammed, M. (2023). Energetic and physical properties of Moroccan biochar nutshells and their energy briquettes. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 43(9), 1509-1523. <https://doi.org/10.1080/19392699.2022.2119558>

Anupam, K., Sharma, A. K., Lal, P. S., Dutta, S., & Maity, S. (2016). Preparation, characterization and optimization for upgrading *Leucaena leucocephala* bark to biochar fuel with high energy yielding. *Energy*, 106, 743-756. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.100>

Aracil, J. (2015). *Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética*. Mundi-Prensa.

Akubo, K., Nahil, M. A., & Williams, P. T. (2019). Pyrolysis-catalytic steam reforming of agricultural biomass wastes and biomass components for production of hydrogen/syngas. *Journal of the Energy Institute*, 92(6), 1987-1996. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2018.10.013>

Basu, P. (2013). *Biomass gasification, pyrolysis, and torrefaction: Practical design and theory* (Second edition). Academic Press is and imprint of Elsevier.

Biomass Users Network (BUN-CA). (2022). *Manuales sobre energía renovable biomasa*.

Bridle, T. R., & Pritchard, D. (2004). Energy and nutrient recovery from sewage sludge via pyrolysis. *Water Science and Technology*, 50(9), 169-175. <https://doi.org/10.2166/wst.2004.0562>

Brown, R. C. (Ed.). (2019). *Thermochemical processing of biomass: Conversion into fuels, chemicals and power* (2nd edition). John Wiley & Sons.

Colorado, A., Morales, O., Ossa, D., Amell, A., & Chica, E. (2022). Modeling the optimal condition for drying rumen contents using a solar greenhouse dryer. *Case Studies in Thermal Engineering*, 30, 101678. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101678>

DANE- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (s. f.). *Geovisores de Estadísticas Agropecuarias*.

DANE- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2021). *Perspectivas económicas de Santander 2020*.

DANE- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2023). *Cuentas departamentales 2022 preliminar*.

Danesh, P., Niaparast, P., Ghorbannezhad, P., & Ali, I. (2023). Biochar Production: Recent Developments, Applications, and challenges. *Fuel*, 337, 126889. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126889>

Departamento Nacional de Planeación. (2022). *Informe anual de avance en la implementación de los ODS en Colombia*. [https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Sinergia/Documentos/2022\\_14\\_04\\_Informe\\_anual\\_avance\\_implementation\\_ODS\\_en\\_Colombia\\_2022.pdf](https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Sinergia/Documentos/2022_14_04_Informe_anual_avance_implementation_ODS_en_Colombia_2022.pdf)

Dirección de Investigaciones Económicas - FNC. (2022, julio). Precios del café, área cultivada y producción. Estadísticas Cafeteras.  
<https://federaciondecafeteros.org/wp/estadisticas-cafeteras/>

El café. (2022). Los Libros de la Catarata.

el-Yassin, F. A., Fontenot, J. P., & Chester-Jones, H. (1991). Fermentation characteristics and nutritional value of ruminal contents and blood ensiled with untreated or sodium hydroxide-treated wheat straw. *Journal of Animal Science*, 69(4), 1751.  
<https://doi.org/10.2527/1991.6941751x>

European Commission. Joint Research Centre. Institute for Environment and Sustainability. (2010). Biochar application to soils: A critical scientific review of effects on soil properties, processes and functions. Publications Office.  
<https://data.europa.eu/doi/10.2788/472>

Fang, Z., Smith Jr, R. L., & Xu, L. (Eds.). (2020). Production of Biofuels and Chemicals with Pyrolysis (Vol. 10). Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-2732-6>

Fedepalma. (s. f.). Área sembrada público. SISPA. Fedepalma. SISPA.  
<https://sispalplus.fedepalma.org/Reportes/Reporte/73>

Federacion Cafetera de Colombia. (s. f.). POSCOSECHA.  
<https://www.cafedecolombia.com/particulares/poscosecha/>

Ghatak, H. R. (2011). Biorefineries from the perspective of sustainability: Feedstocks, products, and processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 4042-4052.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.034>

Ghahremani, A., Manteghian, M., & Kazemzadeh, H. (2021). Removing lead from aqueous solution by activated carbon nanoparticle impregnated on lightweight expanded clay aggregate. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(1), 104478. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104478>

Ghysels, S., Ronsse, F., Dickinson, D., & Prins, W. (2019). Production and characterization of slow pyrolysis biochar from lignin-rich digested stillage from lignocellulosic ethanol production. *Biomass and Bioenergy*, 122, 349-360. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.040>

Glaser, B., Lehmann, J., Steiner, C., Nehls, T., Yousaf, M., & Zech, W. (2002). Potential of Pyrolyzed Organic Matter in Soil Amelioration. Paper presented at the 12th ISCO conference. @inproceedings{Glaser2002PotentialOP, title={Potential of Pyrolyzed Organic Matter in Soil Amelioration}, author={Bruno Glaser and Johannes Lehmann and Christoph Steiner and Thomas Nehls and Muhammad Yousaf and Wolfgang Zech}, year={2002}, url={https://api.semanticscholar.org/CorpusID:55030637} }

González Salcedo, L. O., Serna Cock, L., Martínez Correa, H. A., Dussan Sarria, S., Clavijo Salinas, J. C., Valencia Hernández, L. J., Agudelo Henao, A. C., Andrade Mahecha, M. M., Torres Castañeda, H. G., Vanegas Mahecha, P., Rodríguez Salcedo, J., Cadavid Rodríguez, D. Y., & Ordóñez Santos, L. E. (2021). Alternativas de aprovechamiento de los residuos en la agroindustria (Primera edición). Editorial Universidad Nacional de Colombia; Universidad Nacional de Colombia. Dirección de Investigación y Extensión. Facultad de Ingeniería y Administración.

Güleç, F., Williams, O., Kostas, E. T., Samson, A., Stevens, L. A., & Lester, E. (2022). A comprehensive comparative study on methylene blue removal from aqueous solution using

biochars produced from rapeseed, whitewood, and seaweed via different thermal conversion technologies. *Fuel*, 330(May), 125428. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125428>

Gupta, G. K., & Mondal, M. K. (2022). Pyrolysis. En *Biofuels and Bioenergy* (pp. 279-300). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85269-2.00024-1>

Hadey, C., Allouch, M., Alami, M., Boukhlifi, F., & Loulidi, I. (2022). Preparation and Characterization of Biochars Obtained from Biomasses for Combustible Briquette Applications. *The Scientific World Journal*, 2022, 1-13. <https://doi.org/10.1155/2022/2554475>

Haider, F. U., Wang, X., Zulfiqar, U., Farooq, M., Hussain, S., Mehmood, T., Naveed, M., Li, Y., Liqun, C., Saeed, Q., Ahmad, I., & Mustafa, A. (2022). Biochar application for remediation of organic toxic pollutants in contaminated soils; An update. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 248, 114322. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.114322>

Hammud, H. H., Hammoud, M. H., Hussein, A. A., Fawaz, Y. B., Abdul Hamid, M. H., & Sheikh, N. S. (2023). Removal of Malachite Green Using Hydrochar from PALM Leaves. *Sustainability*, 15(11), 8939. <https://doi.org/10.3390/su15118939>

Hell, R. (1997). Molecular physiology of plant sulfur metabolism. *Planta*, 202(2), 138-148. <https://doi.org/10.1007/s004250050112>

Herrera, K., Morales, L. F., Tarazona, N. A., Aguado, R., & Saldarriaga, J. F. (2022). Use of Biochar from Rice Husk Pyrolysis: Part A: Recovery as an Adsorbent in the Removal of Emerging Compounds. *ACS Omega*, 7(9), 7625-7637. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c06147>

Hornung, A. (Ed.). (2014). *Transformation of biomass: Theory to practice*. Wiley.

Huerta Muñoz, E., & Cruz Hernández, J. (2018). Efectos de los abonos orgánicos en el crecimiento de plantas de geranio y belén. *Acta Agrícola y Pecuaria*, 4(2). <https://doi.org/10.30973/aap/2017.4.2/3>

ICA. (2022). Censos Pecuarios Nacional. Instituto Colombiano Agropecuario. <https://www.ica.gov.co/areas/pecuaria/servicios/epidemiologia-veterinaria/censos-2016/censo-2018>

Jeong, J., Jeon, G., Ryu, S., & Lee, J. H. (2022). Ecofriendly and Electrically Conductive Cementitious Composites Using Melamine-Functionalized Biochar from Waste Coffee Beans. *Crystals*, 12(6), 820. <https://doi.org/10.3390/cryst12060820>

Konneh, M., Wandera, S. M., Murunga, S. I., & Raude, J. M. (2021). Adsorption and desorption of nutrients from abattoir wastewater: Modelling and comparison of rice, coconut and coffee husk biochar. *Heliyon*, 7(11), e08458. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08458>

La Cal Herrera, J. A. (2020). *Energía de la biomasa y el agua (1.0)*. Editorial Elearning, S.L.

Li, H., Dong, X., Da Silva, E. B., De Oliveira, L. M., Chen, Y., & Ma, L. Q. (2017). Mechanisms of metal sorption by biochars: Biochar characteristics and modifications. *Chemosphere*, 178, 466-478. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.03.072>

Li, X., Peng, B., Liu, Q., & Zhang, H. (2022). Microwave pyrolysis coupled with conventional pre-pyrolysis of the stalk for syngas and biochar. *Bioresource Technology*, 348, 126745. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.126745>

Li, H., Mahyoub, S. A. A., Liao, W., Xia, S., Zhao, H., Guo, M., & Ma, P. (2017). Effect of pyrolysis temperature on characteristics and aromatic contaminants adsorption behavior of

magnetic biochar derived from pyrolysis oil distillation residue. *Bioresource Technology*, 223, 20-26. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.10.033>

Liang, B., Lehmann, J., Sohi, S. P., Thies, J. E., O'Neill, B., Trujillo, L., Gaunt, J., Solomon, D., Grossman, J., Neves, E. G., & Luizão, F. J. (2010). Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil. *Organic Geochemistry*, 41(2), 206-213. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2009.09.007>

Liu, Z., Quek, A., Kent Hoekman, S., & Balasubramanian, R. (2013). Production of solid biochar fuel from waste biomass by hydrothermal carbonization. *Fuel*, 103, 943-949. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.07.069>

Lubwama, M., & Yiga, V. A. (2018). Characteristics of briquettes developed from rice and coffee husks for domestic cooking applications in Uganda. *Renewable Energy*, 118, 43-55. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.003>

Manickam, P., & Duraisamy, G. (2019). 3Rs and circular economy. En *Circular Economy in Textiles and Apparel* (pp. 77-93). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102630-4.00004-2>

Mosoarca, G., Popa, S., Vancea, C., Dan, M., & Boran, S. (2022). Removal of Methylene Blue from Aqueous Solutions Using a New Natural Lignocellulosic Adsorbent—Raspberry (*Rubus idaeus*) Leaves Powder. *Polymers*, 14(10), 1966. <https://doi.org/10.3390/polym14101966>

Nations Unies (Ed.). (1997). Glossary of environment statistics. United Nations.

Nwajiaku, I. M., Olanrewaju, J. S., Sato, K., Tokunari, T., Kitano, S., & Masunaga, T. (2018). Change in nutrient composition of biochar from rice husk and sugarcane bagasse at

varying pyrolytic temperatures. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 7(4), 269-276. <https://doi.org/10.1007/s40093-018-0213-y>

Pabón, I., & Ospina, L. (2009). Revisión del estado del arte de la tecnología de explosión a vapor y planteamiento de una estrategia de experimentación al interior del grupo de bioprocesos y flujos reactivos de la Universidad Nacional. Universidad nacional de Colombia.

Pandey, A. (2011). *Biofuels: Alternative feedstocks and conversion processes* (1st ed). Academic Press.

Pathania, D., Sharma, S., & Singh, P. (2017). Removal of methylene blue by adsorption onto activated carbon developed from *Ficus carica* bast. *Arabian Journal of Chemistry*, 10, S1445-S1451. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.04.021>

Pecha, B., & Garcia-Perez, M. (2015). Pyrolysis of Lignocellulosic Biomass: Oil, Char, and Gas. *Bioenergy*, 413-442. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407909-0.00026-2>

Qiu, J., Fernandes De Souza, M., Robles-Aguilar, A. A., Ghysels, S., Ok, Y. S., Ronsse, F., & Meers, E. (2023). Improving biochar properties by co-pyrolysis of pig manure with bio-invasive weed for use as the soil amendment. *Chemosphere*, 312, 137229. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137229>

Rawat, J., Saxena, J., & Sanwal, P. (2019). *Biochar: A Sustainable Approach for Improving Plant Growth and Soil Properties*. IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.82151

Regúnaga, M., Báez, G., Ganduglia, F., & Massot, J. M. (2008). Diagnóstico y estrategias para la mejora de la competitividad de la agricultura argentina. CARI (Consejo Argentino para las Relaciones Internacionales) : FAO (Organización de las Naciones Unidas

para la Agricultura y la Alimentación) : IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura).

Ríos V., M. (2014). Aprovechamiento del contenido ruminal bovino para ceba cunicola, como estrategia para diezmar la contaminación generada por el matadero en San Alberto. *Prospectiva*, 10(2), 56. <https://doi.org/10.15665/rp.v10i2.234>

Sangsuk, S., Napanya, P., Tasen, S., Baiya, P., Buathong, C., Keeratisoontornwat, K., & Suebsiri, S. (2023). Production of non-activated biochar based on *Biden pilosa* and its application in removing methylene blue from aqueous solutions. *Heliyon*, 9(5), e15766. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15766>

Sieradzka, M., Reinmöller, M., Küster, F., Kalawa, W., & Magdziarz, A. (2022). Evaluation of Physical and Chemical Properties of Residue from Gasification of Biomass Wastes. *Energies*, 15(10), 3539. <https://doi.org/10.3390/en15103539>

Schmidt, M. P., Ashworth, D. J., Celis, N., & Ibekwe, A. M. (2023). Optimizing date palm leaf and pistachio shell biochar properties for antibiotic adsorption by varying pyrolysis temperature. *Bioresource Technology Reports*, 21, 101325. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101325>

Seoáñez Calvo, M. (2013). *Tratado de la biomasa: Con especial incidencia sobre la biomasa como fuente energética*. McGraw-Hill España.

Shackley, S., & Sohi, S. (2010). *An Assessment of the Benefits and Issues Associated with the Application of Biochar to Soil: A report commissioned by the UK Department for Environment, Food and Rural Affairs and Department of Energy and Climate Change (DECC)*.

Shahib, I. I., Ifthikar, J., Oyekunle, D. T., Elkhelifi, Z., Jawad, A., Wang, J., Lei, W., & Chen, Z. (2022). Influences of chemical treatment on sludge derived biochar; Physicochemical

properties and potential sorption mechanisms of lead (II) and methylene blue. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3), 107725. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107725>

Shi, W., Lian, W., Tian, S., Gong, X., Yu, Q., Guo, Z., Zhang, X., Ma, B., Bian, R., Zheng, J., Cheng, K., & Pan, G. (2023). A review of agronomic and environmental properties of inorganic compounds in biochars. *Current Research in Environmental Sustainability*, 5, 100226. <https://doi.org/10.1016/j.crsust.2023.100226>

Speight, J. G. (2020). *Synthetic fuels handbook: Properties, process, and performance* (Second edition). McGraw-Hill.

Sze Ki Lin, C., Kaur, G., Li, C., & Yang, X. (Eds.). (2021). *Waste valorisation: Waste streams in a circular economy*. Wiley.

Uchimiya, M., Chang, S., & Klasson, K. T. (2011). Screening biochars for heavy metal retention in soil: Role of oxygen functional groups. *Journal of Hazardous Materials*, 190(1-3), 432-441. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.03.063>

Van Dam, J. (2016). Subproductos de la palma de aceite como materias primas de biomasa. *Revista Palmas*, 37 (Especial Tomo II).

Wang, K., Peng, N., Zhang, D., Zhou, H., Gu, J., Huang, J., Liu, C., Chen, Y., Liu, Y., & Sun, J. (2023). Efficient removal of methylene blue using Ca(OH)<sub>2</sub> modified biochar derived from rice straw. *Environmental Technology & Innovation*, 31(139), 103145. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103145>

Wang, P., Chen, W., Zhang, R., & Xing, Y. (2022). Enhanced Removal of Malachite Green Using Calcium-Functionalized Magnetic Biochar. *International Journal of*

*Environmental Research and Public Health*, 19(6), 3247.

<https://doi.org/10.3390/ijerph19063247>

Wang, S., & Luo, Z. (2017). Pyrolysis of biomass. De Gruyter.

Xu, X., Cao, X., & Zhao, L. (2013). Comparison of rice husk- and dairy manure-derived biochars for simultaneously removing heavy metals from aqueous solutions: Role of mineral components in biochars. *Chemosphere*, 92(8), 955-961.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.03.009>

Yadav, K., Tyagi, M., Kumari, S., & Jagadevan, S. (2019). Influence of Process Parameters on Optimization of Biochar Fuel Characteristics Derived from Rice Husk: A Promising Alternative Solid Fuel. *BioEnergy Research*, 12(4), 1052-1065.

<https://doi.org/10.1007/s12155-019-10027-4>

Yavari, S., Malakahmad, A., Sapari, N. B., & Yavari, S. (2017). Synthesis optimization of oil palm empty fruit bunch and rice husk biochars for removal of imazapic and imazapyr herbicides. *Journal of Environmental Management*, 193, 201-210.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.035>

Yang, W., Lu, C., Liang, B., Yin, C., Lei, G., Wang, B., Zhou, X., Zhen, J., Quan, S., & Jing, Y. (2023). Removal of Pb(II) from Aqueous Solution and Adsorption Kinetics of Corn Stalk Biochar. *Separations*, 10(8), 438. <https://doi.org/10.3390/separations10080438>

Zeng, K., Minh, D. P., Gauthier, D., Weiss-Hortala, E., Nzihou, A., & Flamant, G. (2015). The effect of temperature and heating rate on char properties obtained from solar pyrolysis of beech wood. *Bioresource Technology*, 182, 114-119.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.112>

Zhang, X., Zhao, B., Liu, H., Zhao, Y., & Li, L. (2022). Effects of pyrolysis temperature on biochar's characteristics and speciation and environmental risks of heavy metals in sewage sludge biochars. *Environmental Technology & Innovation*, 26, 102288. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102288>